

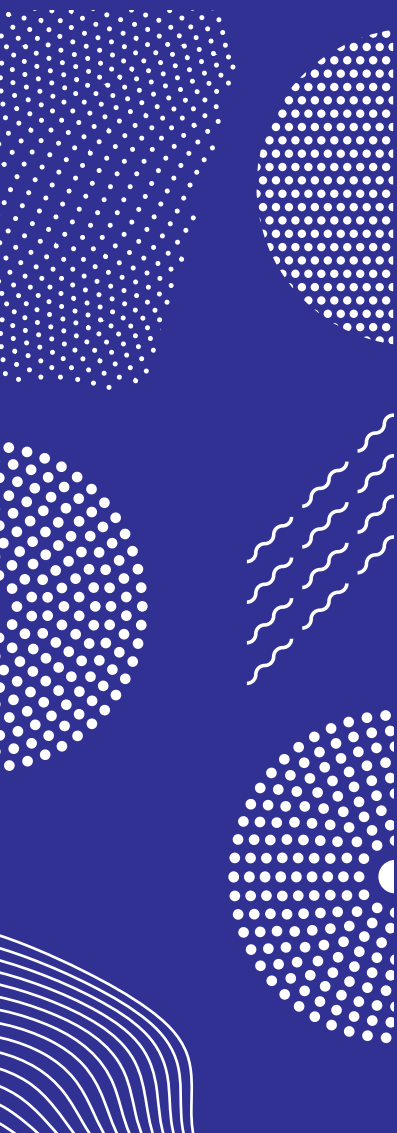


ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2019:2

SUOMEN MUUTTUVA ILMASTO – TIETOA SÄHKÖNSIIRTOJÄRJESTELMÄN RISKIEN ARVIOINTIA VARTEN

ILARI LEHTONEN
KIMMO RUOSTEENOJA
ANTTI MÄKELÄ



RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS

No. 2019:2

SUOMEN MUUTTUVA ILMASTO – TIETOA SÄHKÖN-
SIIRTOJÄRJESTELMÄN RISKIEN ARVIOINTIA VARTEN

Ilari Lehtonen
Kimmo Ruosteenoja
Antti Mäkelä

Ilmatieteen laitos
Meteorologiska institutet
Finnish Meteorological Institute

Helsinki 2019

ISBN 978-952-336-071-6 (nide)

ISBN 978-952-336-077-8 (pdf)

ISSN 0782-6079

Erweko

Helsinki, 2019

Julkaisija Ilmatieteen laitos <i>Erik Palménin aukio 1</i> PL 503 00101 Helsinki		Julkaisusarjan nimi ja numero Raportteja 2019:2
		Julkaisuaika Toukokuu 2019
Tekijät Ilari Lehtonen, Kimmo Ruosteenoja ja Antti Mäkelä		Toimeksiantaja Caruna Networks Oy
Nimeke Suomen muuttuva ilmasto – tietoa sähkönsiirtojärjestelmän riskien arviointia varten		
Tiivistelmä <p>Meneillään olevan ihmiskunnan aiheuttaman ilmastomuutoksen vaikutukset ovat havaittavissa jo nyt: esimerkiksi Suomen keskilämpötila on noussut 1800-luvun puolivälistä yli kaksi astetta. Lämpeneminen on ollut Suomessa noin kaksi kertaa nopeampaa kuin maapallolla keskimäärin. Tulevaisuuden muutokset erilaisten sääilmiöiden esiintymisessä riippuvat vahvasti kasvihuonekaasupäästöjen määrästä: mitä tehokkaammin kasvihuonekaasujen päästöjä onnistutaan rajoittamaan, sitä vähäisemmiksi ilmastomuutoksen vaikutukset jäävät. Ilmakehään jo päässeeseen hiilidioksidin suhteellisen pitkistä viipymääjasta johtuu, että ilmasto joka tapauksessa vielä lämpenee seuraavina vuosikymmeninä, vaikka fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä onnistuttaisiin leikkaamaan nopeastikin.</p> <p>Tässä tutkimuksessa käsitellään ilmastomuutoksen vaikutusta sähköverkkoliiketoiminnan kannalta oleellisiin sääilmiöihin. Keskeisimmät tähän mennessä havaitut ja kuluvan vuosisadan puoliväliin mennessä odotettavissa olevat muutokset on koottu sääilmiöittäin sisällysluettelon edellä olevaan taulukkoon. Selvimmin havaittavat muutokset liittyvät lämpötilan nousuun. Esimerkiksi kasvu-kaudet pidentyvät kesällä ja lumipeite vähenee talvella. Sen sijaan esimerkiksi myrskyisyydessä ei välttämättä tapahdu merkittäviä muutoksia, mutta lämpenemisestä johtuva roudan väheneminen todennäköisesti lisää talviaikaisia tuulituhoja. Vastaavasti esimerkiksi jokien talvitulvien odotetaan selvästi yleistyvän, vaikka sademäärä ei talvella kasvaisikaan enempää kuin noin 10–20 %. Tämä johtuu siitä, että lämpötilan noustessa entistä suurempi osa sateesta tulee vetenä. Muutokset eivät myöskään ole yleensä kovin suuria, jos tarkastelu ulotetaan vain noin 30–40 vuoden päähän. Kuluvan vuosisadan puoliväliin mennessä ilmasto lämpenee todennäköisesti suunnilleen yhtä paljon kuin se on tähän mennessä lämmennyt 1970–1980-lukuihin verrattuna. Tällöin 2050-luvun ilmasto olisi jo selkeästi erilainen kuin 1970–1980-lukujen ilmasto, vaikka muutos nykyhetken ilmastoon verrattuna olisi melko maltillinen.</p> <p>Lämpenemisestä huolimatta samat sääilmiöt tuottavat meillä harmia tulevaisuudessa kuin nykyisinkin. Myrskyt säilyvät merkittävimpana laajoja ja äkillisiä metsätuhoja aiheuttavana sääilmiönä. Kesäisin esiintyy tuhoisia ukkosmyröitä, eivätkä lumeen ja pakkaseen liittyvät ongelmat katoa talvella. Suomen ilmastolle tyypillinen suuri vuosienvälinen vaihtelu jatkuu yhä myös tulevaisuudessa.</p>		
Julkaisijayksikkö Sään ja ilmastomuutoksen vaikutustutkimus		
Luokitus (UDK) 551.461.2, 551.524.3, 551.553.3, 551.553.6, 551.577.3, 551.578.4, 551.583.1, 551.588.7, 632.111.6, 632.111.7, 632.111.8, 632.116.1, 663.116.2, 632.117.1, 632.118.1		Asiasanat ilmasto, ilmastomuutos, ilmastoskenaariot, ilmastomuutokseen sopeutuminen, ilmastoriskit, sähkönsiirtojärjestelmät
ISSN ja avainnimeke ISSN 0782-6079 Raportteja		
ISBN 978-952-336-071-6 (nide) 978-952-336-077-8 (pdf)	Kieli suomi (tiivistelmä myös ruotsiksi ja englanniksi)	Sivumäärä 34

Utgivare Meteorologiska institutet <i>Erik Palméns plats 1</i> PB 503 00101 Helsingfors		Publikationens serie och nummer Rapporter 2019:2
		Datum Maj 2019
Författare Ilari Lehtonen, Kimmo Ruosteenoja och Antti Mäkelä		Uppdragsgivare Caruna Networks Oy
Rubrik Klimatet förändras i Finland – klimatdata för bedömning av risker för kraftledningsnätet		
Sammandrag <p>Människornas aktiviteter har en betydelsefull roll för de klimatförändringar vi redan ser idag. Till exempel har medeltemperaturen i Finland redan stigit med mer än två grader sedan mitten av 1800-hundratalet. Temperaturökningen i Finland har varit dubbelt snabbare än i världen i medeltal. De framtida förändringarna i frekvensen av olika väderfenomen beror avsevärt på utvecklingen av växthusgasernas koncentrationer i atmosfären; ju effektivare man lyckas begränsa utsläpp av växthusgaser, desto mindre skall följderna av klimatförändringen bli. Klimatet kommer att värmas upp ännu i tiotals år, även om växthusgasutsläppen minskar snabbt. Orsaken är att koldioxiden, som redan finns i atmosfären, är relativt långlivat och således håller dess klimatpåverkan i sig en längre tid.</p> <p>I denna utredning behandlas klimatförändringens inverkan på sådana väderfenomen, som har avsevärd betydelse för elnäten. De mest betydande förändringarna i framtiden förorsakas av de stigande temperaturerna. För tillfället genomgår medeltemperaturen en förhöjning på ca. 0,3 till 0,4 grader per årtionde. Detta leder bl.a. till en förlängd termisk växtperiod. Förhöjda vintertemperaturer kommer att minska på snötäcket och tjälen. Å andra sidan kommer vindförhållandena antagligen inte att förändras avsevärt, men på grund av grundare tjäle, så kommer vintertida stormskador i skogarna ändå att förvärras. Nederbörds mängderna på vintern ökar med 10–20 %, och då andelen regn ökar, leder detta till att översvämningar i vattendrag blir vanligare vintertid.</p> <p>Då man granskar förändringar i klimatförhållandena på ett 30–40 års tidsintervall, så är förändringarna inte så markanta. Medeltemperaturerna stiger till mitten av 2000-talet med ungefär lika mycket, som de har stigit från 1970–80-talen fram till nu. Således kommer klimatet på 2050-talet ändå vara betydligt annorlunda än det var på 1970–80-talen, fastän förändringen till nutiden är rätt måttlig.</p> <p>Trots ett varmare klimat, så kommer samma väderfenomen som nu att åstadkomma problem även i framtiden. Stormarna kommer även i fortsättningen att stå för de mest vidsträckta och plötsliga skadorna i skogarna. På somrarna förekommer sporadiska förödande åskbyar och om vintrarna på vintrarna fortsätter snö och kyla att orsaka problem. Det finska klimatet karakteriseras även i framtiden av stora vädervariationer från år till år.</p>		
Publikationsenhet Forskning av väder och klimatförändringens effekter		
Klassificering (UDK) 551.461.2, 551.524.3, 551.553.3, 551.553.6, 551.577.3, 551.578.4, 551.583.1, 551.588.7, 632.111.6, 632.111.7, 632.111.8, 632.116.1, 663.116.2, 632.117.1, 632.118.1		Nyckelord klimat, klimatförändring, klimatscenarier, anpassning till klimatförändringen, risker, elöverföring, global uppvärmning
ISSN ja och serietitel ISSN 0782-6079 Rapporter		
ISBN 978-952-336-071-6 (volum) 978-952-336-077-8 (pdf)	Språk finska (sammandrag också på svenska och engelska)	Sidantal 34

Publisher Finnish Meteorological Institute <i>Erik Palménin aukio 1</i> P.O. Box 503 00101 Helsinki, Finland		Report name and number Reports 2019:2
		Date May 2019
Authors Ilari Lehtonen, Kimmo Ruosteenoja and Antti Mäkelä		Commissioned by Caruna Networks Oy
Title Changing climate of Finland – information for evaluating the risks related to electric power transmission systems		
Abstract <p>The impacts of ongoing anthropogenic climate change are already noticeable: for instance, the mean temperature in Finland has risen more than 2 °C since the mid-19th century. In Finland, the rate of warming has surpassed the global average approximately by a factor of two. Future changes in the occurrence of weather phenomena are strongly dependent on the amount of greenhouse-gas emissions: the more successfully the greenhouse-gas emissions will be restricted, the smaller the impacts of climate change will be. During the next few decades, global warming will continue even in the case if the greenhouse-gas emissions due to the use of fossil fuels would decrease rapidly. This is because carbon dioxide is a long-lived gas in the atmosphere.</p> <p>In this study, the impacts of climate change are inspected by concentrating on weather phenomena relevant to power transmission systems. The most notable changes are related to the rise of temperature. At the moment, air temperature in Finland increases approximately at the rate of 0.3–0.4 °C per decade. This leads to a prolongation of the thermal growing season, for instance. In winter, rising temperatures result in decreasing snow cover and shortening of soil frost season. Annual precipitation is projected to increase by about 5–10% by the mid-21st century. The projected increase in precipitation is largest in winter, approximately 10–20%. As the share of liquid precipitation will increase in winter due to rising temperatures, wintertime river floods are expected to become much more common. In storminess, however, only small changes are expected. Notwithstanding, forest damage due to windstorms are likely to increase due to the decreasing soil frost.</p> <p>In general, the projected changes in climate are mainly not remarkable when considering as short time horizons as about 30–40 years. By the mid-21st century, the rate of increase in mean temperature compared to the current conditions is most likely comparable to the realized temperature increase after the 1970s and 1980s. This would imply only a relatively modest change compared to the current conditions, although the climate of 2050s would nevertheless be clearly different from the climate of 1970s and 1980s.</p> <p>In spite of the ongoing global warming, the same weather phenomena that cause damage nowadays, will also do so in the future. Windstorms will remain as the most significant weather hazard causing abrupt and widespread forest damage. Occasional thunderstorms will occur in summer and the problems related to snow, ice and frost will not disappear in winter. In particular, large interannual variability will characterize the Finnish climate in the future as well.</p>		
Publishing unit Weather and Climate Change Impact Research		
Classification (UDK) 551.461.2, 551.524.3, 551.553.3, 551.553.6, 551.577.3, 551.578.4, 551.583.1, 551.588.7, 632.111.6, 632.111.7, 632.111.8, 632.116.1, 663.116.2, 632.117.1, 632.118.1		Keywords climate, climate change, climate scenarios, adaptation for climate change, climate risks, electric power transmission systems, global warming
ISSN and series title ISSN 0782-6079 Reports		
ISBN 978-952-336-071-6 (print) 978-952-336-077-8 (pdf)	Language Finnish (abstract also in Swedish and English)	Pages 34

Ilmiö	Havaitut muutokset tähän asti	Ennakoidut muutokset kuluvan vuosisadan aikana
Lämpötila	Keskilämpötila on kohonnut 1800-luvun puolivälistä alkaen reilut 2 °C. Muutos on ollut suurin talvella (jopa lähes viisi astetta) ja pienin loppukesällä (0,7°C).	Lämpötila nousee tällä hetkellä noin 0,3–0,4 °C vuosikymmenessä. Lämpeneminen on voimakainta talvella ja lämpeneminen jatkuu likimain nykyistä vauhtia seuraavat 20–30 vuotta. Tämän jälkeen lämpenemisen nopeus riippuu suuresti siitä miten paljon kasvihuonekaasujen päästöjä onnistutaan rajoittamaan. Lämpenemisen pysäyttäminen edellyttäisi kasvihuonekaasupäästöjen erittäin nopeaa rajoittamista.
Sademäärä	Sademäärät eivät ole suuresti muuttuneet eikä rankkasadeilmastossa ole tapahtunut havaittavaa muutosta.	Vuotuinen sademäärä kasvaa vuosisadan puoliväliin mennessä noin 5-10 %. Muutos on suurin talvella, mutta myös kesäisten rankkasateiden odotetaan voimistuvan.
Lumipeite ja lumikuormat	Lounais-Suomessa lumen-syvyyydet ovat jo pienentyneet ja lumipeiteaika lyhentynyt.	Lumipeiteaika lyhenee ja etenkin Etelä- ja Länsi-Suomessa lumipeite ohenee. Puiden rasakat lumikuormat voivat kuitenkin kasvaa Pohjois-Karjalasta Lappiin ulottuvalla alueella, kun muualla ne todennäköisesti pienenevät.
Routa	Useimpina vuosina maa jäätyy myöhemmin ja sulaa aikaisemmin kuin 1900-luvulla	Routainen aika lyhenee ja etenkin turvemailla on useina talvina hyvin vähän routaa.
Myrskyt ja tuulisuus	Keskimääräisessä tuulen nopeudessa on havaittu heikko laskeva trendi. Myrskyisyys on vaihdellut vuosikymmenestä toiseen ilman selkeää trendiä. Euroopassa on ollut suuria myrskytuhoja 1980-luvun jälkeen.	Myrskyisyys pysynee likimain ennallaan. Länstien tuulten suhteellinen osuus todennäköisesti lisääntyy entisestään. Roudan väheneminen voi lisätä tuulituhoja talvella.
Ukkonen ja salamet	Suuri salamamäärien vaihtelu vuodesta toiseen ja heikko laskeva trendi. Keskimääräinen salamatiheys on suurin maan länsi- ja keskiosissa. Yksittäisiä voimakkaita rajuilmoja voi esiintyä missä päin Suomea tahansa.	Ukkosille suotuisten olosuhteiden määrä näyttäisi jonkin verran kasvavan. Vaikutus on selvin suurten kasvihuonekaasupäästöjen RCP8.5-skenaariota toteutuessa. Voimakkaimpien ukkosten osuus voi kasvaa.
Merenpinnan korkeus	Maankohoaminen on ollut nopeampaa kuin merenpinnan nousu.	Pohjanlahden rannikolla maankohoaminen jatkuu merenpinnan nousua nopeampana vuosisadan puoliväliin asti. Vuosisadan jälkipuoliskolla merenpinnan odotetaan kohoavan Suomenlahden rannikolla useita kymmeniä senttimetrejä ja myös Pohjanlahden rannikolla merenpinta mahdollisesti kääntyy nousuun.

Sisällysluettelo

1 Johdanto	8
2. Aineisto ja menetelmät	9
3 Ilmastomuutos Caruna Oy:n toimialueilla	12
3.1 Lämpötila	12
3.2 Sade	15
3.3 Lumipeite ja puiden lumikuormat	17
3.4 Routa	20
3.5 Myrskyt ja tuulisuus	22
3.6 Ukkonen ja salamät	26
3.7 Merenpinnan korkeus	28
4 Yhteenveto ja johtopäätökset	30
Kiitokset	30
Kirjallisuusviitteet	30

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on pysynyt viime vuosina ajankohtaisena aiheena yhteiskunnallisessa keskustelussa ja mitä suurimmalla todennäköisyydellä se tulee olemaan sitä myös lähitulevaisuudessa. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia eri toimialoilla onkin tutkittu lukuisissa eri selvityksessä. Sähköverkkojen suunnittelussa ilmastonmuutoksen huomioiminen on tärkeää, sillä sähköverkot ovat jatkuvasti alttiita ilmastollisille rasituksille ja sähköverkkojen toiminta-aika on useita vuosikymmeniä. Samaan aikaan sähkönjakelulta odotetaan jatkuvasti entistä parempaa suoritusvarmuutta.

Sääilmiöistä erityisesti myrskyt ja rajuilmat aiheuttavat toisinaan laajoja sähkökatkoja. Viime vuosilta tästä ovat esimerkkeinä mm. kesän 2010 rajuilmat (Asta, Veera, Lahja ja Sylvi) ja tapaninpäivän myrsky v. 2011. Tapani-myrskyn jäljiltä sähkökatkesivat kaikkiaan yli 500 000 asiakkaalta. Pahimmilla tuhoalueilla yli 80 % talouksista oli yhtäaikaaisesti sähköttä (Horelli, 2012). Laajat sähkökatkot ovat toistuvasti herättäneet keskustelua sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseen tähtäävistä toimenpiteistä. Vuonna 2001 sattuneiden syysmyrskyjen jälkeen kauppa- ja teollisuusministeriö teki selvityksen sähkönjakelun turvaamisesta myrskyjen sattuessa. Tällöin linjattiin, että kohtuullinen sähkönjakelun katko voi kestää enintään 12 tuntia. Jälleen vuoden 2011 Tapani-myrskyn jälkeen työ- ja elinkeinoministeriö tilasi selvityksen sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamisesta (Partanen et al., 2012). Myrskytuhojen lisäksi laaja-alaisia sähkökatkoja voivat aiheuttaa muun muassa puuston lumituhot, kuten nähtiin Kainuussa talvella 2017–18. Lisäksi sää vaikuttaa suuresti myös esimerkiksi jännitelinjojen koronahäviöihin (Lahti et al., 1997).

Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta sähköverkkoliiketoimintaan on vuonna 2006 julkaistu Valtion Taloudellisen Tutkimuskeskuksen (VTT) toimesta laaja noin 70-sivui- nen raportti (Martikainen, 2006). Tämän VTT:n raportin ilmastonmuutosennusteet perustuivat Ruotsissa kehitetyllä RCAO-mallilla (Döscher et al., 2002) tehtyihin alueellisesti tarkennettuihin ilmastonmuutossimulaatioihin kahden maailmanlaajuisen ilmastomallin (HadAM3-H ja ECHAM4-OPYC3) tulosten pohjalta. Ilmastonmuutosennusteisiin liittyvän epävarmuuden arviointiin kahden ilmastomallin käyttö on kuitenkin auttamattoman pieni joukko. Pelkästään maailmanlaajuisia ilmastomalleja on kehitetty eri tutkimuslaitoksissa ja yliopistoissa yli 50. Lisäksi ilmastomallien kehitystyö on edennyt viimeisten reilun kymmenen vuoden aikana, joskaan tiedeyhteisön käsitys odotettavissa olevasta ilmastonmuutoksesta ei ole oleellisilta osin muuttunut. VTT:n vuoden 2006 raportin jälkeen on lisäksi julkaistu lukuisia uusia aihepiiriä sivuavia tutkimuksia. Láng (2017) tutki meteorologian alan pro gradu -työssään myrskyjen vaikutuksia sähköverkkoihin Suomessa. Laajassa euroopanlaajuisessa RAIN-hankkeessa tutkittiin erilaisten kriittisten infrastruktuurien herkkyyttä eri sääilmiöille ja ilmastonmuutoksen vaikutusta näihin riskitekijöihin (Groenemeijer et al., 2015, 2016). Tarkempaa sovelluskohtaista tietoa ilmastonmuutoksesta on hiljattain tuotettu mm. Kemijoki Oy:lle (Veijalainen et al., 2018). Suomen Ilmastopaneelin tuore raportti puolestaan arvioi laaja-alaisesti ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsätuhojen näkökulmasta (Asikainen et al., 2019). Lisäksi ilmastonmuutoksen vaikutuksia eri sektoreilla ja tarvittavia sopeutumistoimia on arvioitu lukuisissa muissa tutkimushankkeissa. Tämä raportti kokoaa yhteen näissä uusissa tutkimuksissa saatuja tuloksia ilmastonmuutoksen vaikutuksista sähköverkkoliiketoimintaan ja päivittää siten VTT:n raportin tuloksia.

2. Aineisto ja menetelmät

Tulevien vuosikymmenten ilmaston arvioimisessa keskeisimpiä työkaluja ovat ilmastomallit, jotka kuvaavat ilmakehän ja valtameren käyttäytymistä virtausmekaniikan ja lämpöopin peruslakien avulla. Tällaisia tietokonemalleja kehitetään yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa eri puolilla maailmaa. Ilmastomallit pyrkivät mahdollisimman hyvin huomioimaan ilmakehän, valtameren, maaperän ja kasvillisuuden välisiä vuorovaikutuksia. Malleja, joiden laskenta-alue kattaa koko maapallon kutsutaan maailmanlaajuisiksi ilmastomalleiksi. Tämän lisäksi on kehitetty alueellisia ilmastomalleja, joiden laskenta-alue on pienempi, jonka vuoksi niillä voidaan tehdä alueellisesti tarkempia laskelmia hyödyntäen laskenta-alueen reunoilla maailmanlaajusten ilmastomallien tulosten antamia reunaehtoja.

Ilmastomalleilla voidaan arvioida ilmaston tilaa vuosikymmenten päähän, ja ilmastomalliajot mahdollistavat ilmaston keskimääräisen muutoksen lisäksi myös äärimmäisten sääilmiöiden muutosten arvioimisen. Pääosin ilmastomalliajojen tulokset ovat kansainvälisen tutkijayhteisön vapaasti käytettävissä. Suomessa Ilmatieteen laitos on yhdessä muiden tutkimuslaitosten ja yliopistojen kanssa tutkinut ilmastomme muuttumista näiden mallitulosten perusteella eri tutkimushankkeissa. Noin kuuden vuoden välein YK:n alainen Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) julkaisee kokoomateoksen ilmastotutkimuksen viimeisimmistä tuloksista. IPCC:n vuosina 2013–2014 julkaisema viides arviointiraportti maapallon ilmaston muuttumisesta perustuu ilmastomallien uusimpaan sukupolveen, CMIP5-malliajoihin (IPCC, 2013). Tätä edellinen neljäs arviointiraportti perustui CMIP3-malliajoihin (IPCC, 2007). Tässä selvityksessä kootaan yhteen aiemmissa tutkimushankkeissa ilmastomalliajojen tulosten perusteella saatuja tutkimustuloksia, jotka perustuvat pääosin CMIP5-malliajoihin, mutta osin myös varhaisempiin CMIP3-malliajoihin.

Ilmastomuutosennusteiden pohjaksi tarvitaan arvioita kasvihuonekaasujen ja ilmassa leijuvien pienhiukkasten pitoisuuksien kehittymisestä tulevana vuosikymmeninä. Tätä varten on laadittu vaihtoehtoisia kehityskulkuja kasvihuonekaasujen päästöistä, ns. päästöskenaarioita. CMIP3-malliajot hyödynsivät ns. SRES-skenaarioita (Nakićenovič et al., 2000), joista käytetyimmät olivat B1, A1B ja A2. Uudemmat CMIP5-malliajot puolestaan tehtiin käyttäen RCP-skenaarioita (Representative Concentration Pathways; van Vuuren et al., 2011), joita on yhteensä neljä erilaista (kuva 1). Niistä optimistisin RCP2.6-skenaario olettaa maailmanlaajusten hiilidioksidipäästöjen kääntyvän nopeaan laskuun 2020-luvulla ja päästöjen painuvan nolleen noin vuonna 2080. Eniten käytetyt RCP-skenaariot ovat RCP4.5 ja RCP8.5, joista ensimmäisessä päästöt kääntyvät laskuun vuosisadan puolivälissä ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus vakiintuu noin vuonna 2100. RCP8.5-skenaariossa kasvihuonekaasujen päästöt puolestaan jatkavat nopeaa kasvuaan pitkälle vuosisadan jälkipuoliskolle asti ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus lähestyy vuosisadan lopulla jo 1000 ppm:n tasoa. RCP6.0-skenaariossa päästöt pysyvät aluksi vakaina, mutta kiihdyttävät sitten kasvuun, kunnes ne vuosisadan lopulla kääntyvät viimein laskuun. RCP-skenaarioihin liittyvät lukuarvot (2.6, 4.5, 6.0 ja 8.5) kuvaavat säteilypakotteen muutosta (lämmitysvaikutusta) watteina neliometriä kohti siirryttäessä esiteollisesta ajasta vuoteen 2100. Varhaisemmista SRES-skenaarioista B1 vastaa lähinnä RCP4.5-skenaariota ja A1B-skenaario sijoittuu RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden välimaastoon. A2-skenaariossa päästöt lisääntyivät vuosisadan lopulla A1B-skenaariota nopeammin, mutta ilmastomuutos jäi kuitenkin maltillisemmaksi kuin RCP8.5-skenaariossa. Tämän raportin tulokset perustuvat suurimmalta osin RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden mukaisiin ilmastomalliajoihin.

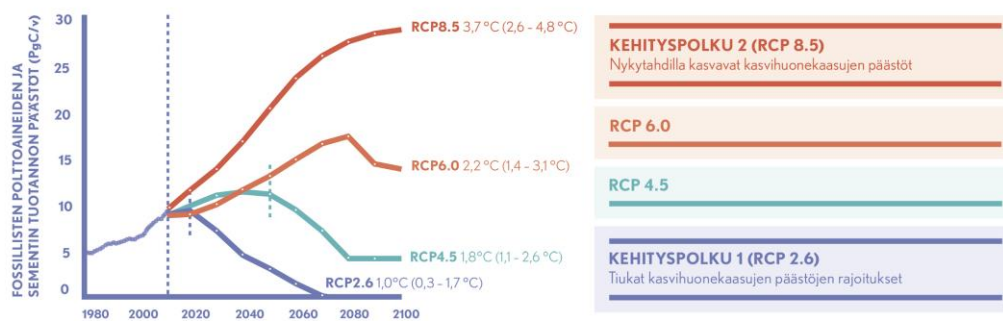
RCP-skenaarioiden yleistajuinen kuvaus hiilidioksidin (CO₂) suhteen on seuraava (Ruostenoja, 2013):

- RCP2.6: Ilmastopolitiikan täydellinen onnistuminen. CO₂:n maailmanlaajuiset päästöt kääntyvät jyrkkään laskuun jo vuoden 2020 jälkeen ja ovat tämän vuosisadan lopulla lähellä nollatasoa. CO₂:n pitoisuus on korkeimmillaan vuosisadan puolivälissä n. 440 ppm ja alkaa sen jälkeen laskea.
- RCP4.5: Ilmastopolitiikan osittainen onnistuminen. CO₂:n päästöt kasvavat aluksi hieman, mutta kääntyvät laskuun vuoden 2040 tienoilla. Vuosisadan loppupuolella pitoisuuden kasvu taittuu, ja tuolloin CO₂:ta on ilmakehässä noin kaksinkertainen määrä teollistumista edeltävään tasoon verrattuna.
- RCP6.0: Päästöt pysyvät aluksi suunnilleen nykyisellä tasollaan mutta ovat myöhemmin tällä vuosisadalla melko suuria. Tällainen kehityskulku vaikuttaa epärealistiselta, joten tätä skenaariota ei tässä raportissa juurikaan tarkastella.
- RCP8.5: Pyrkimys päästöjen rajoittamiseen kokee täydellisen haaksirikon. CO₂:n päästöt kasvavat nopeasti ja kolminkertaistuvat vuoteen 2100 mennessä. CO₂:n pitoisuus kohoaisi tuolloin yli kolminkertaiseksi teollistumista edeltävään aikaan verrattuna. Pitoisuus kasvaisi nopeasti vielä vuoden 2100 jälkeenkin.

TULEVAISUUDEN NÄKYMÄ

RCP-KASVIHUONEKAASUSKENAARIOT

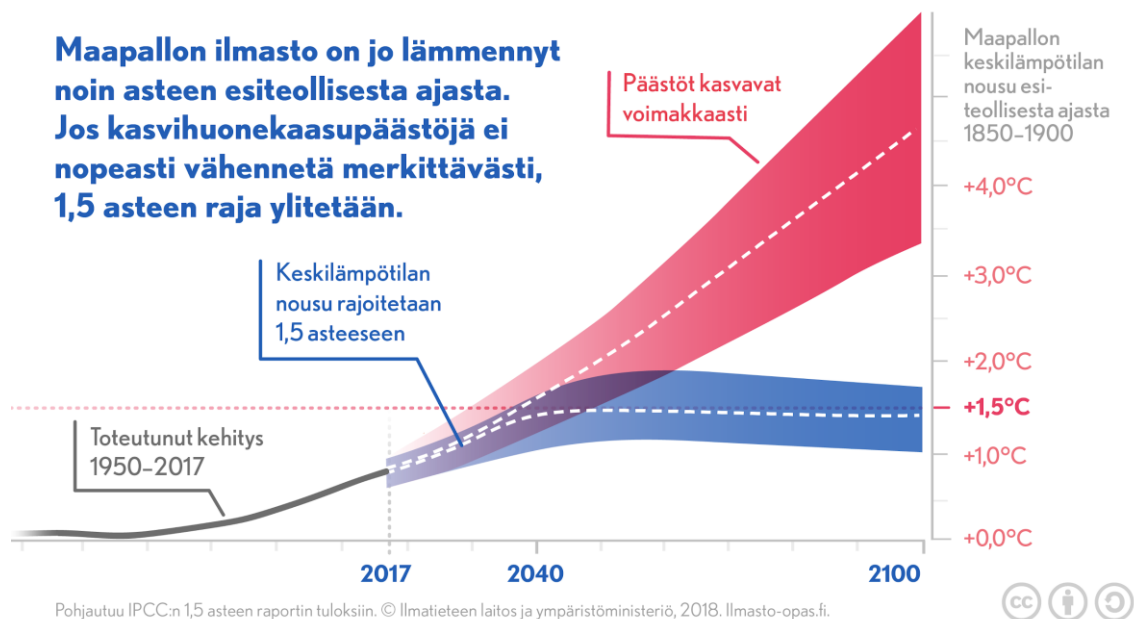
IPCC on määritellyt uudessa raportissaan neljä uutta päästöskenaariota.



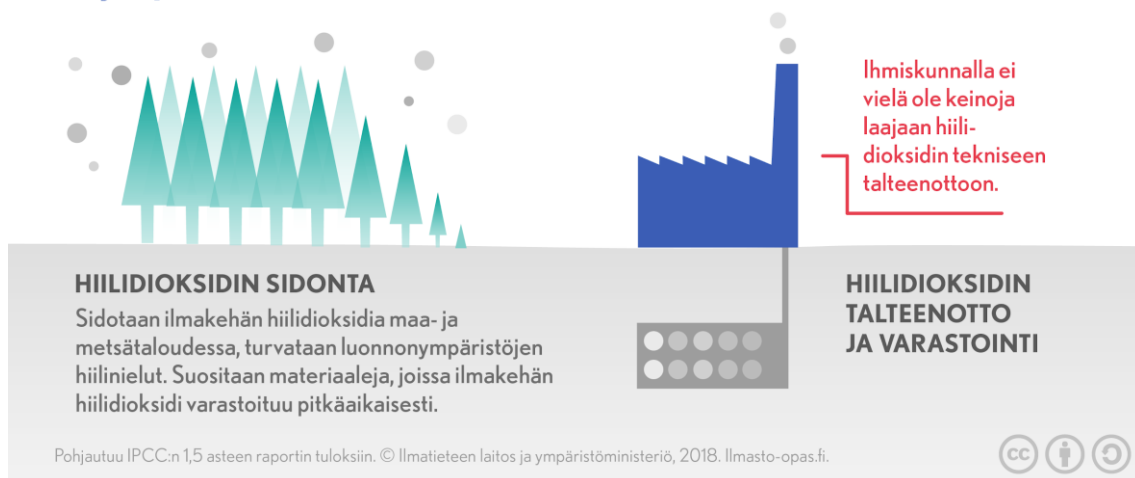
Perustuu IPCC:n 5. arviointiraportin WG1-osaraportin tietoihin.

Kuva 1. RCP-kasvihuonekaasuskenaarioiden mukaiset kasvihuonekaasujen päästöjen kehityskulut (lähde: ilmasto-opas.fi).

Ilmakehän kasvihuonekaasujen tuleviin pitoisuuksiin liittyvän epävarmuuden lisäksi epävarmuutta ilmastonmuutosarvioihin aiheuttaa se, ettei ilmastojärjestelmän herkkyyttä kasvihuonekaasujen pitoisuuksien muutoksille tunneta tarkasti. Tätä havainnollistaa se, että eri ilmastomallit tuottavat erilaisia ilmastonmuutossignaaleja samoilla pääs-



Päästöjen vähentäminen ei yksin riitä rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousua 1,5 asteeseen. Hiilidioksidia on pystyttävä myös poistamaan ilmakehästä.



Kuva 2. Maapallon ilmaston lämpenemisen rajoittamiseen 1,5 °C:een vaadittavia toimenpiteitä.

töskenaarioilla. Lisäksi ilmasto vaihtelee oman epälineaarisen dynamiikkansa takia luontaisestikin ilman ulkoista pakotetta, mikä myös osaltaan selittää eri ilmastomalliajojen tulosten välisiä eroja. Laadittaessa ilmastomuutosarvioita lähitulevaisuuteen suurin arvioihin liittyvä epävarmuuden lähde on yleensä ilmaston luontainen vaihtelu. Pidemmälle tulevaisuuteen katsottaessa eri ilmastomallien tulosten väliset erot korostuvat, ja tarpeeksi kauas tulevaisuuteen mentäessä suurimmaksi ilmastomuutosarvioiden epävarmuuslähteeksi nousee kasvihuonekaasujen pitoisuuden kehittymiseen liittyvä epävarmuus.

Ilmastotutkijoilta kysytään usein, mikä RCP-skenaarioista tulee todennäköisimmän toteutumaan. Kysymys on vaikea, koska toisin kuin esimerkiksi sääennusteiden to-

teutumisessa ja niiden epävarmuudessa, ilmastonmuutosennusteissa keskeinen epävarmuuden lähde on ihmiskunnan toiminta fossiilisten polttoaineiden käytön suhteen; tämän ennustaminen ei ole mahdollista pelkästään sää- eikä ilmastomallien avulla.

Jos kuitenkin oletetaan, että ihmiskunta yltää edes kohtuullisen onnistuneisiin päästörajoituksiin tai vaikkapa merkittäviin edistysaskeliin hiilensidonnassa, on RCP4.5-skenaarion kaltainen kehityskulku mahdollinen. Käytännössä RCP4.5-skenaarion toteutuminen vaatisi erittäin tiukkaa päästöjen rajoittamista. RCP2.6-skenaarion toteutuminen on jo äärimmäisen haastavaa. Molemmissa tapauksissa on oletettu, että päästörajoitukset toteutuvat teollisuusmaissa nopeammin kuin kehitysmaissa.

IPCC:n viimeisimmässä, ns. 1,5 °C raportissa (IPCC, 2018)¹ kuvataan vaikutuksia, joita maapallon lämpeneminen 1,5 °C:lla esiteolliseen aikaan verrattuna aiheuttaisi ja mitä keinoja lämpenemisen hillitsemiseksi tarvitaan (kuva 2).

3 Ilmastonmuutos Caruna Oy:n toimialueilla

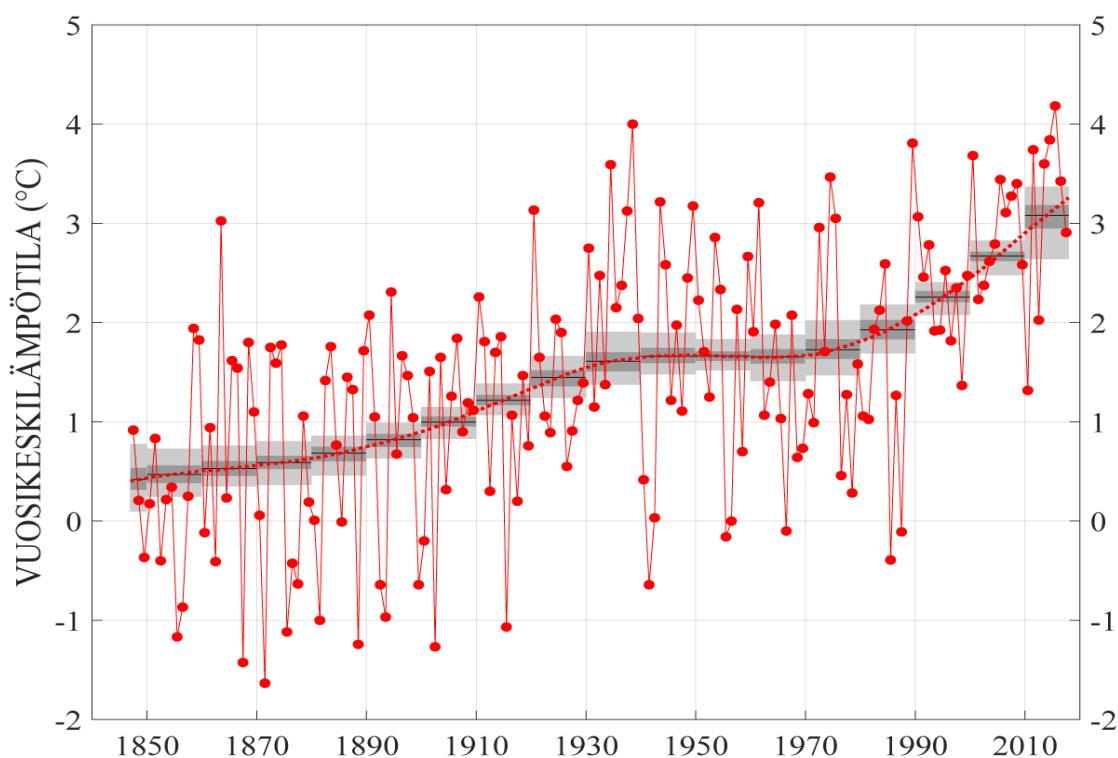
3.1 Lämpötila

Suomessa, kuten muuallakin korkeilla pohjoisilla leveysasteilla, lämpeneminen on voimakkaampaa kuin maapallolla keskimäärin. Tähän vaikuttavat monet tekijät, mm. maa-merijakauman erot maapallon eri osien välillä, napa-alueiden lumi- ja jääpeitteen väheneminen sekä lämpenevän ilmakehän lisääntyvä vesihöyrypitoisuus (mm. Serreze ja Barry, 2011).

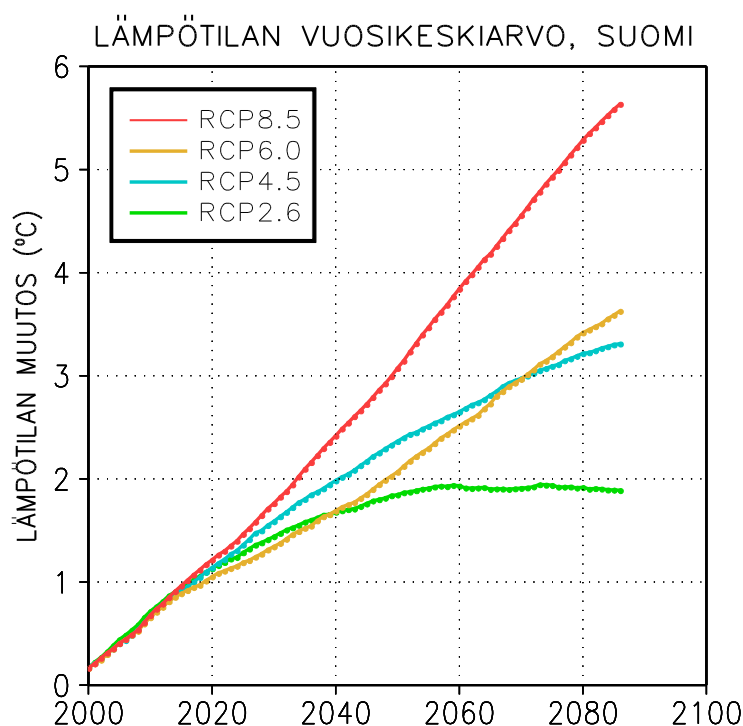
Suomen havaintoihin pohjautuva vuotuinen keskilämpötila jaksolla 1847–2017 on esitetty kuvassa 3 (Mikkonen et al., 2015). Kuvasta nähdään selvästi, että ilmastomme on lämmennyt. Lämpeneminen on ollut 1800-luvun puolivälin jälkeen reilut pari astetta, josta viimeisten noin 50 vuoden osuus on likimain puolet. Voimakkainta lämpeneminen on ollut 1980-luvun jälkeen. Lisäksi nähdään, että vuositasolla keskilämpötila on vaihdellut pari astetta keskimääräisen molemmiin puoliin. Toisin sanoen 1800-luvun lämpimimmät vuodet olivat suunnilleen yhtä lämpimiä kuin keskimääräiset vuodet ovat olleet 2000-luvun alussa ja viime aikojen kylmimmät vuodet ovat olleet suunnilleen samanlämpöisiä kuin tyypilliset vuodet 1800-luvulla. Lähitulevaisuudessa lämpenemisen odotetaan jatkuvan suunnilleen samalla vauhdilla, mikä tarkoittaisi lämpötilan nousevan vuosisadan puoliväliin mennessä runsaan asteen verran lisää (Ruosteenoja et al., 2016). Lämpötilan nousu ei kuitenkaan välttämättä ole tasaista. Esimerkiksi meriveden tiheyseroihin liittyvän Atlantin termohaliinisen kierto liikkeen hidastempoisen vaihtelun, jonka syklin pituus on noin 65–80 vuotta, tiedetään vaikuttavan Euroopan ilmastoon (Sutton ja Hodson, 2005; Knight et al., 2006). Tällaisten vaihteluiden aikataulua on kuitenkin vaikea ennustaa tarkasti.

Arvioitaessa lämpenemisen voimakkuutta pidemmälle tulevaisuuteen arvioiden epävarmuus kasvaa. Joka tapauksessa lämpenemisen voimakkuus riippuu suuresti ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kehityksestä (kuva 4). Mikäli kasvihuonekaasujen päästöt kasvavat voimakkaasti (RCP8.5-skenario), voi vuoden keskilämpötila kohota helposti jo vuosisadan puoliväliin mennessä yli kolmekin astetta jakson 1981–2010 keskiarvoa lämpimämmäksi. Vuosisadan lopulla lämpötila nousisi todennäköisesti noin kolme astetta lisää. Mikäli kasvihuonekaasujen maailmanlaajuiset päästöt saadaan taittumaan laskuun ennen vuosisadan puoliväliä ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus

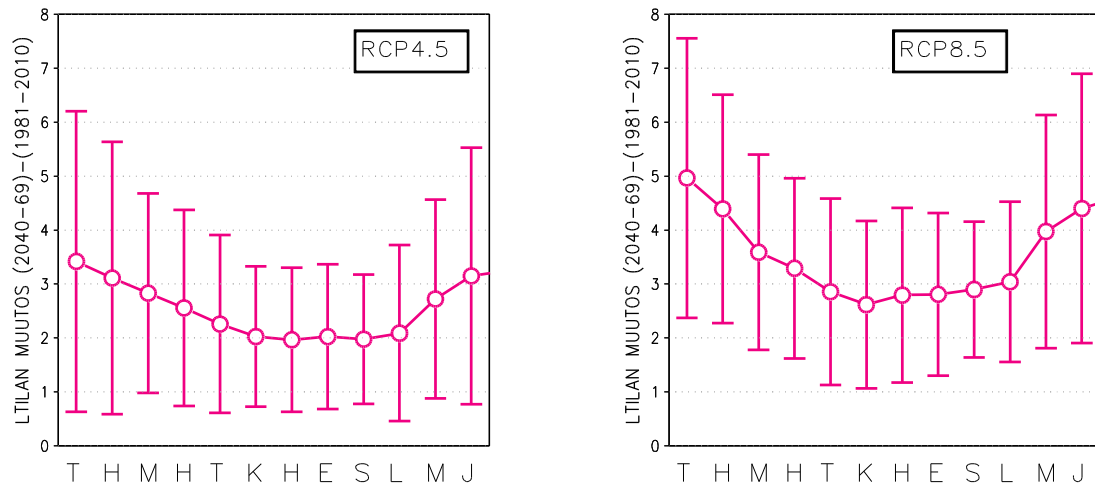
¹ IPCC. 2018. Global Warming of 1.5 °C <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>



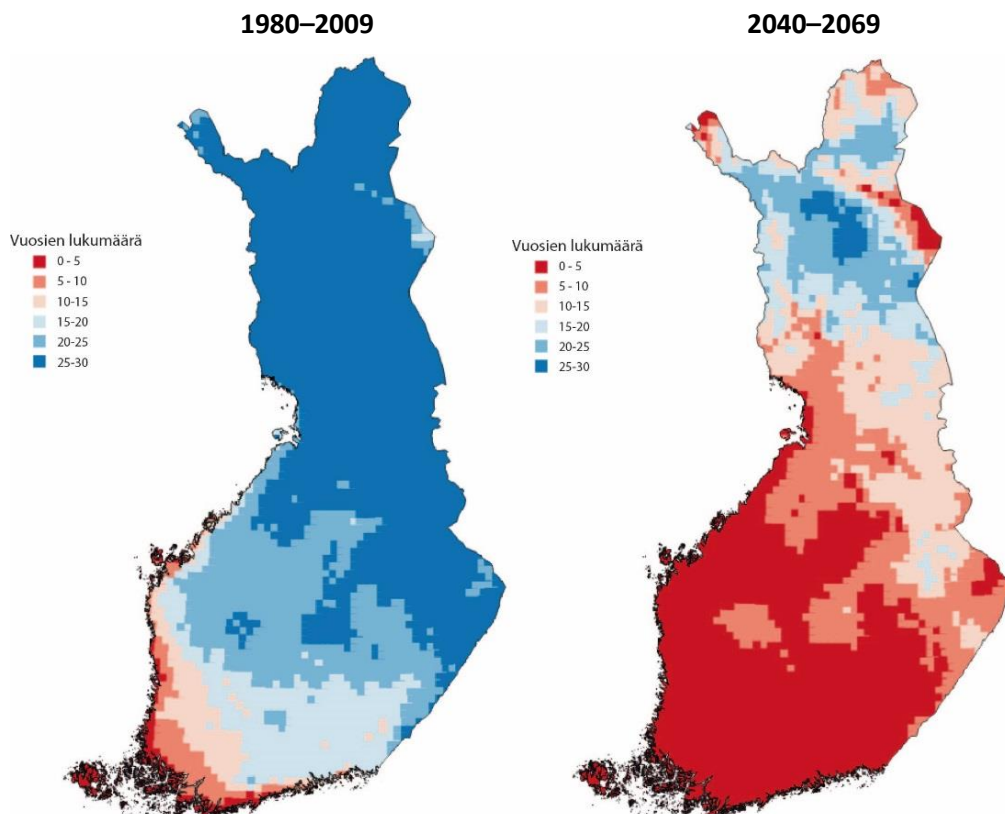
Kuva 3. Suomen vuotuinen keskilämpötila jaksolla 1847–2017 hilamuotoisesta lämpötila-aineistosta arvioituna (Mikkonen et al., 2015). Punainen katkoviiva kuvaa aineistoon sovitettua matemaattista trendimallia, joka pyrkii kuvaamaan lämpötilan vaihtelun pidempijaksoista vaihtelua. Mallin arvioima keskilämpötila vuosikymmenittäin on kuvattu mustilla vaakaviivoilla. Tumma varjostus kuvaa mallin antamien eri vuosikymmenten keskilämpötila-arvioiden 50 % luottamusväliä ja vaalea varjostus 95 % luottamusväliä.



Kuva 4. Vuoden keskilämpötilan muutos Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1981–2010 keskimääräisiin arvoihin. Käyrät esittävät 28 maailmanlaajuisen ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoa neljälle eri RCP-kasvihuonekaasuskenaariolle (RCP8.5, hyvin suuret päästöt; RCP6.0, melko suuret päästöt; RCP4.5, melko pienet päästöt; RCP2.6, hyvin pienet päästöt).



Kuva 5. Keskilämpötilan muutos Suomessa vuoden eri kuukausina siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastomuutosmallin tulosten keskiarvoa ja pystyjanat muutoksen 90 % todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleinen kuva edustaa RCP4.5-skenaariota (melko pienet päästöt) ja oikeanpuoleinen RCP8.5-skenaariota (hyvin suuret päästöt). Kaikki luvut ovat koko Suomen alueen keskiarvoja.



Kuva 6. Niiden talvien lukumäärä 30-vuotijaksoilla 1980–2009 (vas.) ja RCP4.5-skenaarion mukaisesti jaksolla 2040–2069 (oik.), jona vuorokauden alin lämpötila on laskenut vähintään kerran -27°C :n alapuolelle. Kuvassa esitetyt arvot ovat kuuden ilmastomallin antamien ennusteiden keskiarvoja (Asikainen et al., 2019).

vakiintumaan vuosisadan loppuun mennessä (RCP4.5-skenaario), ennustetaan lämpötilan nousevan edelleen vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla noin yhden asteen lisää. Ainoastaan kasvihuonekaasujen päästöjen nopea ja voimakas lasku (RCP2.6-skenaario) joltai lämpenemisen pysähtymiseen likimain vuosisadan puolivälissä.

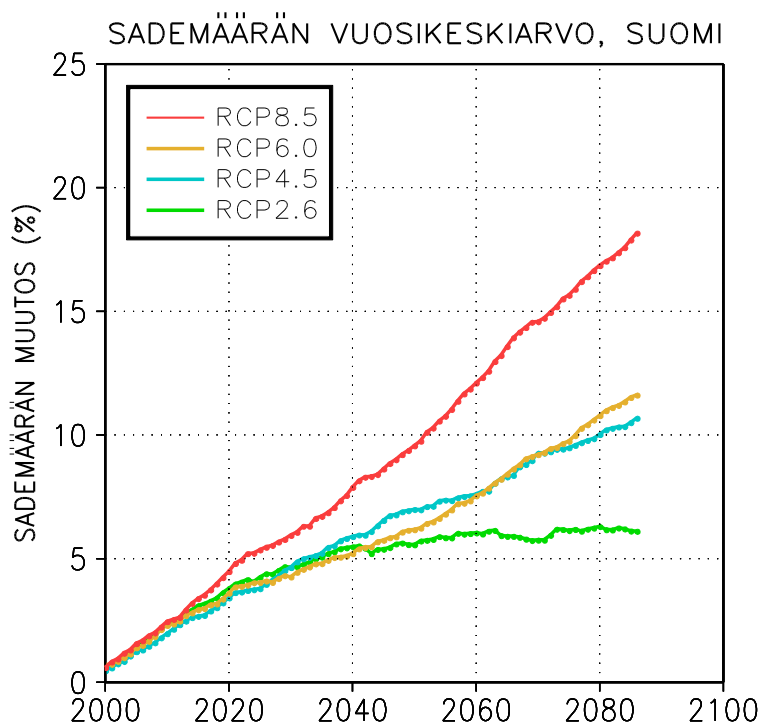
Suomessa lämpötilan nousu on voimakkainta talvella ja vähäisintä kesällä (kuva 5). Karkeasti ottaen lämpötila nousee talvella lähes kaksi kertaa niin paljon kuin kesällä. Suurten päästöjen RCP8.5-skenaariossa tämä tarkoittaisi lämpötilan nousevan kesällä todennäköisimmin noin 2–3 asteella ja talvella noin 4–5 asteella kuluva vuosisadan puoliväliin mennessä, kun verrataan jakson 1981–2010 tilanteeseen. Pienempien päästöjen RCP4.5-skenaariossa lämpötilat saavuttaisivat vastaavan tason todennäköisesti vuosisadan loppuvuosikymmeninä. RCP8.5-skenaariossa lämpeneminen olisi vuosisadan puoliväliin mennessä 90 % todennäköisyydellä talvella noin 2–7 asteen ja kesällä 1–4 asteen luokkaa (kuva 5). Pohjois-Suomessa lämpeneminen on talvella jonkin verran voimakkaampaa kuin Etelä-Suomessa. Lisäksi talvella lämpötilan vaihtelun odotetaan pienenevän. Tämä tarkoittaa, että kaikista eniten lauhtuvat kovimmat talvipakkaset. Esimerkiksi -27 °C alittavia lämpötiloja esiintyy nykyilmastossa laajalti Itä- ja Pohjois-Suomessa käytännössä liki joka talvi ja maan eteläosienkin sisämaassa useimpina talvina (kuva 6). Jo vuosisadan puolivälissä näin kylmien lämpötilojen arvioidaan käyvän Etelä- ja Länsi-Suomessa hyvin harvinaisiksi. Edes Lapissa näin kovat pakkaset eivät olisi liki jokatalvisia muualla kuin Keski-Lapin kaikkein kylmimmillä seuduilla.

Kesällä sekä kylmimmät että lämpimimmät lämpötilat kohoavat arviolta suunnilleen yhtä paljon. Tämä tarkoittaa, että mikäli keskilämpötila nousee parilla asteella, esiintyy lämmenneessä ilmastossa esimerkiksi yli 27 °C:n lämpötiloja suunnilleen yhtä usein kuin aiemmin vallinneessa ilmastossa yli 25 °C:n lämpötiloja. Lämpeneminen johtaa siten hellejaksojen yleistymiseen ja pitenemiseen (Kim et al., 2018). Vuosisadan puoliväliin mennessä hellepäivien määrän odotetaan karkeasti arvioiden vähintään kaksinkertaistuvan 1900-luvun lopun tilanteeseen verrattuna.

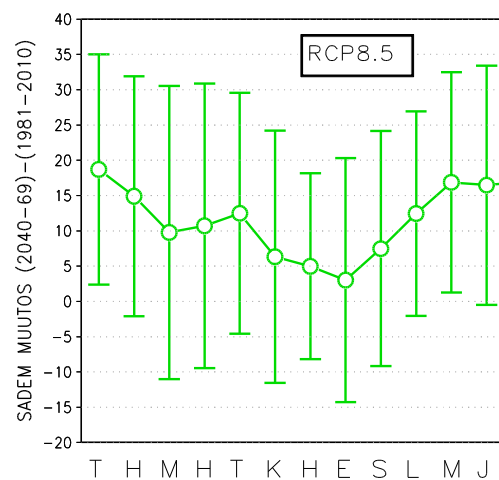
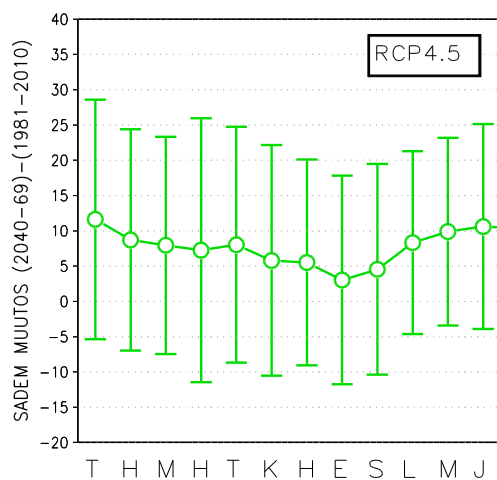
3.2 Sade

Vuotuisen sademäärän arvioidaan kasvavan Suomessa kuluva vuosisadan aikana skenaariosta riippuen 7–18 % (kuva 7). Eniten sademäärä kasvaa talvella ja pienin muutos on odotettavissa kesällä (kuva 8). Kesällä osa ilmastomalleista ennakoii sademäärien jopa pienenevän, etenkin Etelä-Suomessa. Talvella sademäärä kuitenkin melko todennäköisesti kasvaa koko maassa, ainakin jonkin verran. Alueellisesti tarkasteltuna sademäärän ennakoidaan kasvavan Pohjois-Suomessa jonkin verran enemmän kuin Etelä-Suomessa. Lämpötilan tapaan sademäärän ennustettujen muutosten erot eri päästöskenaarioiden välillä seurailevat skenaarioiden eroja kasvihuonekaasujen pitoisuuksissa. Suurempien päästöjen skenaariot tuottavat siis suurimmat muutokset.

Lämpötilan muutoksiin verrattuna sademäärän ennustetut muutokset ovat paljon epävarmempia. Osittain tämä johtuu sateiden paikallisesti paljon vaihtelevammasta luonteesta; etenkin rankimmat sateet ovat usein hyvin pienialaisia. Näin ollen vaikka voimakkaita rankkasateita esiintyy ukkoskuurojen yhteydessä jossain päin Suomea käytännössä joka kesä, osuu tällainen erityisen rankka kuuro harvoin johonkin tiettyyn paikkaan. Esimerkiksi sadekuuro, jossa vettä sataa tunnin aikana 30 mm toistuu Katajiston (1969) määrittämien rankkasateiden toistuvuusaikojen mukaan yhdessä paikassa karkeasti arvioiden noin kerran 35 vuodessa, kun taas sadekuuron, jossa vettä sataa tunnissa 35 mm vastaava toistuvuusaika on jo noin 80 vuotta. Kuitenkin tällaisia sadekuuroja esiintyy jossain päin



Kuva 7. Vuotuisen sademäärän muuttuminen Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1981–2010 keskiarvoon (prosentteina). Muutokset ovat 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin tulosten keskiarvoja, jotka on esitetty erikseen neljälle kasvihuonekaasuskenaariolle.



Kuva 8. Sademäärien prosentteina ilmaistu muutos Suomessa eri kuukausina verrattaessa jaksoja 1981–2010 ja 2040–2069. Käyrä esittää 28 maailmanlaajuisen ilmastomallin laskelmien keskiarvoa, pystypylväät muutokselle laskettua 90 %:n todennäköisyysväliä. Vasemmanpuoleinen kuva esittää melko pienten päästöjen RCP4.5-skenaariota, oikeanpuoleinen hyvin suurten päästöjen RCP8.5-skenaariota. Kaikki luvut ovat koko Suomen keskiarvoja.

maata useita joka kesä, kuurot vain osuvat harvoin samoihin paikkoihin. Rankkasateiden esiintymisen satunnaisuudesta johtuen niiden toistuvuusaikojen arviointi on epävarmaa eikä rankkasateiden voimakkuudessa tapahtuvia muutoksia ole myöskään helppo todentaa. Saku et al. (2016) tutkivat Katajiston (1969) 1960-luvulla määrittämien rankkasateiden toistuvuusaikojen käyttökelpoisuutta uusimpien havaintojen pohjalta. Tuloksista voitiin päätellä, että uusimpien havaintojen pohjalta lasketut toistuvuustasot vastasivat melko hyvin aiempia, eikä rankkasateiden esiintymisessä ole siis ainakaan toistaiseksi tapahtunut vielä selvästi havaittavaa muutosta. Myös yksittäisten kuukausien ja vuosien

sademäärät vaihtelevat vuodesta toiseen paljon enemmän kuin lämpötilat. Vuosisadan puoliväliin mennessä ennustettua 5–10 % lisäystä sademäärässä on luultavasti vielä tuoloin vaikea erottaa sademäärän luontaisesta vaihtelusta.

Ilmaston lämpenemisen seurauksena rankkasateiden on tulevaisuudessa kuitenkin ennakoitu yleisesti ottaen voimistuvan (Westra et al., 2014). Tämä johtuu ennen kaikkea siitä, että lämpimämpi ilma pystyy pitämään sisällään enemmän vesihöyryä, mutta lämpötilan ja rankkasateiden voimakkuuden välinen yhteys ei kuitenkaan ole aivan näin suoraviivainen. Sadepäivien määrissä tai poutajaksojen pituuksissa ei meillä odoteta tapahtuvan kesällä suuria muutoksia, joten sademäärän kasvu on seurausta nimenomaan kerralla saatavien sateiden voimistumisesta (Jylhä et al., 2012; Lehtonen et al., 2014). Talvella ennakoidaan lisäksi satavan aiempaa useammin. Mäkelä et al. (2016) tutkivat ennustettuja suurimpien kolmen tunnin sadekertymien muutoksia pääkaupunkiseudulla viiden alueellisen ilmastomallin tulosten pohjalta. Tämän suppean tutkimuksen tulosten mukaan tällaiset lyhytkestoiset rankkasateet voimistuisivat vuosisadan loppuun mennessä RCP4.5-skenaarion toteutuessa todennäköisimmin vajaat 20 % ja RCP8.5-skenaarion toteutuessa vuodenajasta riippuen noin 20–40 %. Kyseisessä mallijoukossa myös kokonais sademäärän muutokset olivat samaa suuruusluokkaa.

Talvipuolella vuotta entistä suurempi osuus sateesta tulee lämpenemisen seurauksena vetenä. Räisänen (2016) tutki asiaa CMIP3-malliajoja hyödyntävien alueellisten ilmastomallien tulosten perusteella. Räisänen (2016) tutkimus perustui A1B-päästöskenaarioon, joka on voimakkuudeltaan likimain RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden puolivälistä. Vesisateiden osuus kasvaa etenkin alkua- ja loppupalvesta, mutta keskitalvellakin (tammi-helmikuussa) jopa yli puolet sateesta tulisi eteläisimmässä Suomessa vuosisadan lopulla vetenä, kun nykyään vesisateiden osuus on 25 %:n luokkaa. Sen sijaan Lapissa 90 % sateesta tai enemmän tulee edelleen vuosisadan puolivälissä lumena joulukuusta maaliskuuhun, mutta vuosisadan loppua kohti vesisateiden osuus kasvaa sielläkin selvemmin myös keskitalven kuukausina. Lumisateiden suhteellisen osuuden pienenemisestä johtuu, että koko talven yli laskettu kumulatiivinen lumisadekertymä pienenee koko maassa, vaikka talvella sademäärä kasvaakin. Lapissa muutos on kuitenkin pieni, vuosisadan loppuun mennessäkin todennäköisimmin alle 20 %, ja johtuu lähinnä talven tulon myöhästyemisestä sekä kevään tulon aikaistumisesta. Sen sijaan lounaissaaristossa lumisateet vähenivät Räisänen (2016) tulosten mukaan jo vuosisadan puoliväliin mennessä kolmanneksella ja vuosisadan loppuun mennessä alle puoleen. Näillä muutoksilla on selkeä vaikutus lumipeitteeseen sekä jokien kevät- ja talvitulviin.

3.3 Lumipeite ja puiden lumikuormat

Lumipeitteen muutokset riippuvat voimakkaasti lämpötilan ja sademäärän muutoksista. Lumipeite reagoi ilmastonmuutokseen herkimmin alueilla, joilla keskilämpötila on talvella nollan lähellä ja näillä alueilla lumen määrän on havaittu maailmanlaajuisesti vähentyneen 1960-luvun jälkeen (Brown ja Mote, 2009). Lämpötilan nousun seurauksena lumipeite muodostuu syksyllä aiempaa myöhemmin ja sulaa keväällä totuttua aiemmin. Kasvava sademäärä voi talvella osittain kompensoida myöhäisempää lumentuloa. Toisaalta koska etenkin maan eteläosissa entistä suurempi osa talvenkin sateista tulee tulevaisuudessa vetenä ja lisäksi lumipeitettä sulattavat talviset suojasäätyyleistyvät, jää kokonaisvaikutus lumipeitteen osalta vääjäämättömästi negatiiviseksi. Talven lumipeiteaika on jo lyhentynyt koko maassa sekä lumensyvytydet pienentyneet laajoilla alueilla tilastollisesti merkitsevästi (Luomaranta et al., 2019).

Räisänen ja Eklund (2012) tutkivat lumipeitteen odotettavissa olevia muutoksia CMIP3-malleihin pohjautuvien alueellisten ilmastomallien tulosten perusteella. Heidän tutkimuksensa perustui A1B-päästöskenaarioon, joka sijoittuu siis RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden välimaastoon. Heidän tulostensa mukaan Lounais-Suomessa kevättalven runsaslumisimpaan aikaan keskimääräinen lumen vesi-arvo, joka on melko hyvin verrannollinen lumensyvyyden kanssa, puolittuisi jo vuosisadan puoliväliin mennessä, kun vertailukohtana käytetään 1900-luvun loppuvuosikymmeniä (kuva 10). Pohjois-Suomessa lumipeite oheneisi selvästi vähemmän, mutta vuosisadan loppuun mennessä sielläkin lumen vesi-arvo pieneneisi noin kolmanneksella. Lounaassa olisi sen sijaan vuosisadan lopulla keskimääräinen lumen vesi-arvo helmikuussa enää kolmanneksen siitä mitä se oli sata vuotta aiemmin. Vaikka lumipeite keskimäärin ohenee, voi yksittäisinä talvina olla lunta tulevaisuudessakin runsaasti. Tällaiset runsaslumiset talvet kuitenkin harvinaistuvat nopeasti ja samaan aikaan hyvin vähälumiset talvet yleistyvät. Näin käy etenkin eteläisillä ja läntisillä rannikkoseuduilla. Räisänen ja Eklundin (2012) tulosten mukaan vuosisadan puolivälissä Koillismaalla nykymittapuun mukaan keskimääräistä runsaslumisempaa olisi noin joka neljäntenä talvena ja lounaassa selvästi tätäkin harvemmin. Vuosisadan lopulla tällaisia talvia sattuisi Koillismaalla ja sitä pohjoisempana edelleen useimpina vuosikymmeninä, mutta Lounais-Suomessa keskimäärin vain ehkä kerran 30 vuodessa. Etenkin Etelä- ja Länsi-Suomessa lumiolosuhteet vaihtelevat talvien välillä nykyilmastossakin huomattavasti, mutta tulevaisuudessa tämä vaihtelu yhä korostuu, kun entistä vähälumisimpien talvien yleistyessä yhä esiintyvät yksittäiset runsaslumiset talvet poikkeavat totutusta aiempaa enemmän.

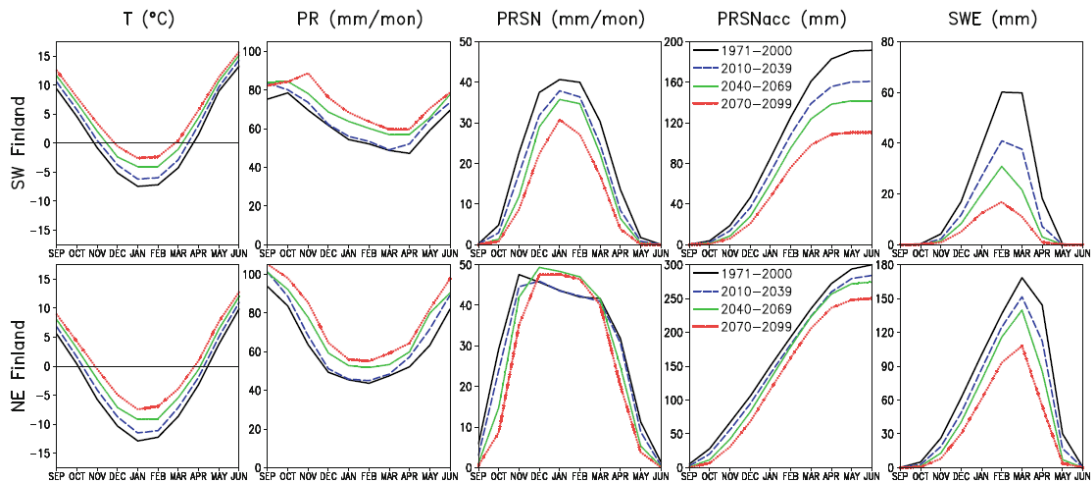
Uudempien CMIP5-mallien pohjalta lumipeitteen odotettavissa olevia muutoksia on tutkittu tarkemmin Kemijoen, Lieksanjoen ja Kymijoen vesistöjen alueilla (Veijalainen et al., 2018). Tämän tutkimuksen tulokset ovat varsin hyvin linjassa Räisänen ja Eklundin (2012) tulosten kanssa. Kymijoen valuma-alueella lumen vesi-arvon ennakoidaan RCP4.5-skenaariototeutuessa keskimäärin laskevan puoleen jakson 1981–2010 tilanteesta jo vuosisadan puoliväliin mennessä. Vuosisadan lopulla lumipeite oheneisi edelleen



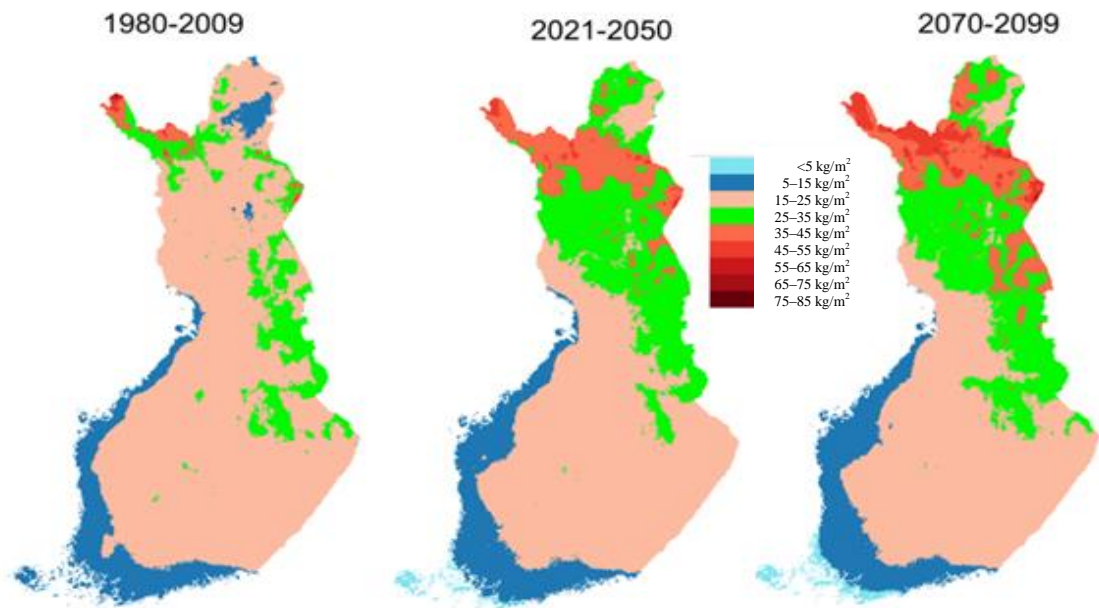
Kuva 9. Sähkölinoille kertyvä huuire aiheuttaa koronahäviöitä sähkönsiirrossa. Tykkyntyneet puut voivat myös taipua linjojen päälle.

lisää. Lieksanjoen valuma-alueella kevättalven lumipeite olisi keskimäärin puolittunut vuosisadan loppuun mennessä ja myös Kemijoen valuma-alueella lumipeitteen ennakoidaan hupenevan läpi talven. Hupeneva lumipeite ja lämpenevät kevät aikaistavat ja heikentävät kevättulvia. Toisaalta talvien vesisateiden lisääntyminen nostaa jokien virtaamia talviaikaan.

Lumipeitteen muutosten lisäksi on tutkittu ilmastomuutoksen vaikutusta puiden oksille kertyviin lumikuormiin (Lehtonen et al., 2016). Puiden latvustoihin lumikuormaa kertyy lumisaateen tarttuessa oksistoihin, mutta myös huurtamalla (kuva 9). Etenkin korkean maaston alueilla huurteen muodostuminen on merkittävin lumikuormaa latvustoihin kerryttävä tekijä. Huurretta muodostuu, kun ilmassa leijuva vesihöyry tiivistyy kylmälle pinnalle tai kun alijäähtyneet vesipisarot törmäävät kiinteään kohteeseen. Eniten huurretta kertyy Itä- ja Pohjois-Suomen vaara-



Kuva 10. Keskimääräinen kuukausittainen ilman lämpötila (T), sademäärä (PR), lumisateen määrä (PRSN), kumulatiivinen lumisadekertymä talven alusta lukien (PRSNacc) ja lumipeitteen vesi-arvo (SWE) 11 CMIP3-malleja hyödyntävän alueellisen ilmastomallin tulosten keskiarvona Lounais-Suomen sisämaassa (ylärivi) ja Koillismaalla (alarivi) sijaitsevilla hilapisteillä jaksoilla 1971–2000, 2010–2039, 2040–2069 ja 2070–2099 A1B-skenaarion mukaisesti (Räisänen ja Eklund, 2012).



Kuva 11. Keskimääräinen talven suurin puiden lumikuorma kuuden ilmastomallin tulosten keskiarvona jaksoilla 1980–2009, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5-skenaarion mukaan. Kuva on peräisin Asikaisen et al. (2019) raportista.

alueiden lakimetsissä matalalla roikkuvien pilvien viistäessä vaarojen lakia. Maastonmuodoilla on siten keskeinen rooli lumen kertymisessä puiden latvustoihin. Lumisade puolestaan tarttuu puiden oksistoihin tehokkaimmin, kun sade tulee märkänä lumena lämpötilan ollessa nollan tuntumassa. Raskaat lumikuormat kertyvät latvustoihin usein vähitellen pitkän ajan kuluessa, mutta toisaalta suojaää ja kova tuuli voivat myös kerralla pudottaa kaiken lumen latvustoista maahan.

Lehtosen et al. (2016) tulosten mukaan ilmaston lämmitessä talven suurimmat puiden lumikuormat kasvavat jonkin verran Pohjois-Karjalasta Lappiin ulottuvalla alueella, kun muualla Suomessa ne pienenevät (kuva 11). Etenkin huurteen kertymiselle otolliset olosuhteet näyttäisivät yleistyvän laajalti Itä- ja Pohjois-Suomessa. Myös raskasta märkää lunta odotetaan kylmimmillä alueilla satavan lämpimämmässä ilmastossa nykyistä useammin. Meillä näin odotetaan tapahtuvan likimain Oulun pohjoispuoleisilla alueilla. Lumituhojen riski voi siis kasvaa samoilla alueilla, joilla raskaimmat puiden lumikuormat esiintyvät myös nykyilmastossa. Myöskään etelä- ja länsirannikolla lumituhoilta ei tulevaisuudessa täysin välttyä; raskaita lumikuormia vain esiintyy aiempaa harvemmin.

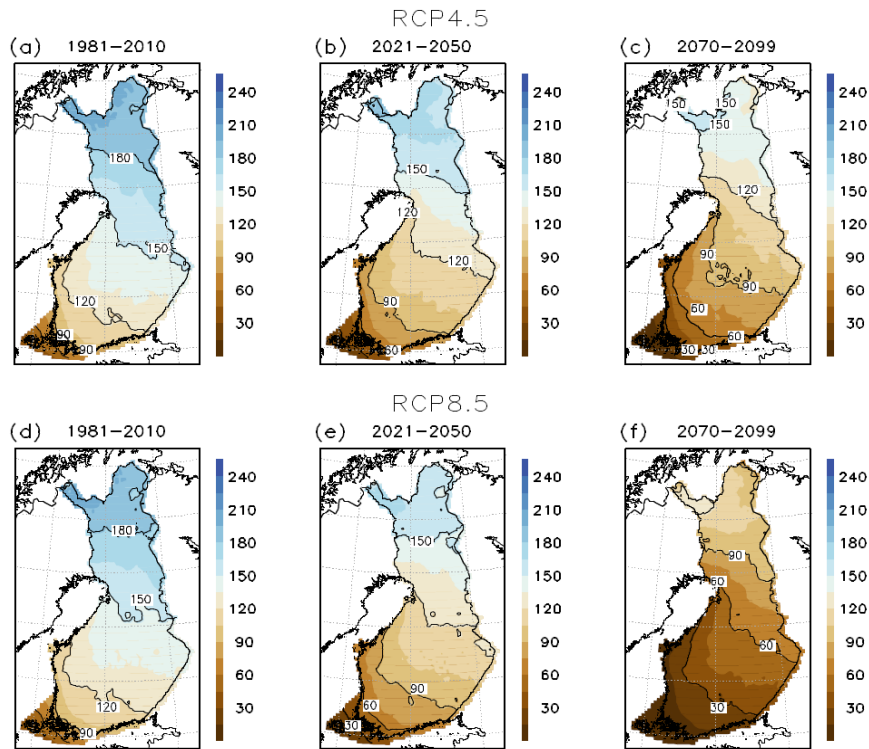
Lumituhojen riskiä on tutkittu myös euroopanlaajuisesti osana laajempaa tuhoa aiheuttavien meteorologisten ilmiöiden esiintymistä selvittänyttä tutkimushanketta (Groenemeijer et al., 2016). Tässä hankkeessa oli käytössä eri mallijoukko kuin Lehtosen et al. (2016) tutkimuksessa, mutta molemmat tutkimukset hyödynsivät lumikuormien mallintamisessa Ilmatieteen laitoksella operatiivisessa käytössä olevaa tykkylumimallia. Groenemeijerin et al. (2016) tulokset olivat hyvin linjassa Lehtosen et al. (2016) tulosten kanssa; myös tämän tutkimuksen mukaan raskaat lumikuormat käyvät vuosisadan loppua kohti yhä harvinaisemmiksi maan etelä- ja lounaisosissa, etenkin suurten päästöjen RCP8.5-skenaarion toteutuessa, mutta pohjoisempina raskaita lumikuormia voisi esiintyä aiempaa useampina talvina.

3.4 Routa

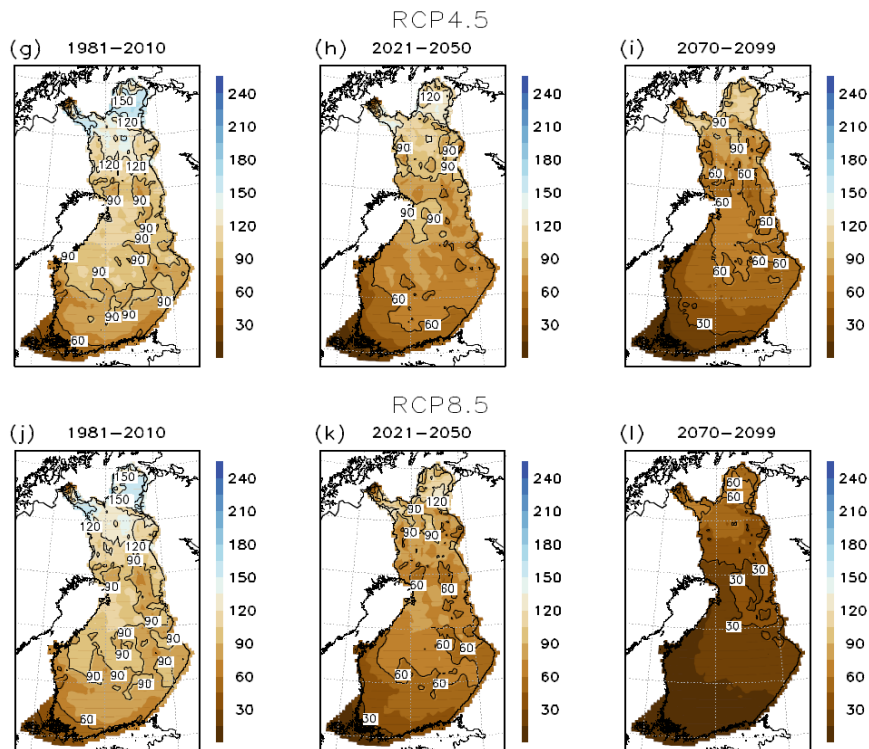
Routaantumiseen vaikuttavat mm. maaperän tyyppi ja pohjaveden korkeus. Tärkeimmät roudan syvyyttä säätelevät säätelijät ovat ilman lämpötila ja lumensyvyys. Lumipeite toimii tehokkaana eristeenä, ja Itä-Suomessa routaa onkin paksun lumipeitteen takia yleensä vähemmän kuin Länsi-Suomessa, vaikka talvet ovat idässä kylmempiä. Ilmastonmuutoksen vaikutusta routaoloihin ovat viimeksi tutkineet Lehtonen et al. (2019). Kuvassa 12 on esitetty Lehtosen et al. (2019) tutkimuksen tulosten mukaisesti eri jaksoilla sellaisten päivien keskimääräinen lukumäärä talvea kohden, jolloin routaa on yli 20 cm ja maaperä on kantava työkoneille. Tulokset on esitetty erikseen turvemaille ja savi- tai silttipohjaisille kivennäismaille, samoin kuin RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioille. Kivennäismailloin routakauden arvioidaan lyhenevän noin kuukaudella siirryttäessä jaksosta 1981–2010 jaksoon 2021–2050. RCP4.5-skenaarion toteutuessa routakausi lyhenisi vielä toisella kuukaudella vuosisadan loppuun mennessä. RCP8.5-skenaariossa lyhennystä tulisi vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla nykyiseen verrattuna jo kolmisen kuukautta, jolloin Etelä- ja Länsi-Suomessa ei enenkään rannikkoseuduilla esiintyisi yli 20 cm:n syvyyteen yltävää routaa kuin satunnaisesti. Turvemaille routa ei ylety yhtä syvälle, ja RCP8.5-skenaarion toteutuessa tällaista kantavaa routaa ei maan eteläpuoliskolla enää vuosisadan lopulla käytännössä esiintyisi.

Aikaisempien sukupolvien ilmastomallien tulosten perusteella ilmastonmuutoksen vaikutusta routaantumiseen kivennäismailloin ovat tutkineet mm. Kellomäki et al. (2010) ja Venäläinen et al. (2001). Näissäkin tutkimuksissa on päädytty samaan johtopäätökseen: lumipeitteen hupenemisesta huolimatta myös routakerros keskimäärin jonkin verran ohenee ilmaston lämmitessä. Ainoastaan Venäläisen et al. (2001) tulosten mukaan maan eteläosissa lumipeite ohenisi niin paljon, että routa voisi lämmentyneessä ilmastossa ulottua jopa nykyistä useammin yli 20 cm:n syvyyteen. Kellomäen et al. (2010) tulosten

Kivennäismaat



Turvemaat



Kuva 12. Talven keskimääräinen routapäivien lukumäärä (routan syvyys yli 20 cm) kuuden ilmastomallin tulosten pohjalta arvioituna savi- tai siltpohjaisilla kivennäismailla sekä turvemailla jaksolla 1981–2010, 2021–2050 ja 2070–2099 RCP4.5- ja RCP8.5-skenaarioiden mukaan.



Kuva 13. Myrskyt aiheuttavat vahinkoa sähköverkolle kaatamalla puita sähkölinjojen päälle. Kuvassa Seija-myrskyn joulukuussa 2013 aiheuttamaa tuhoa.

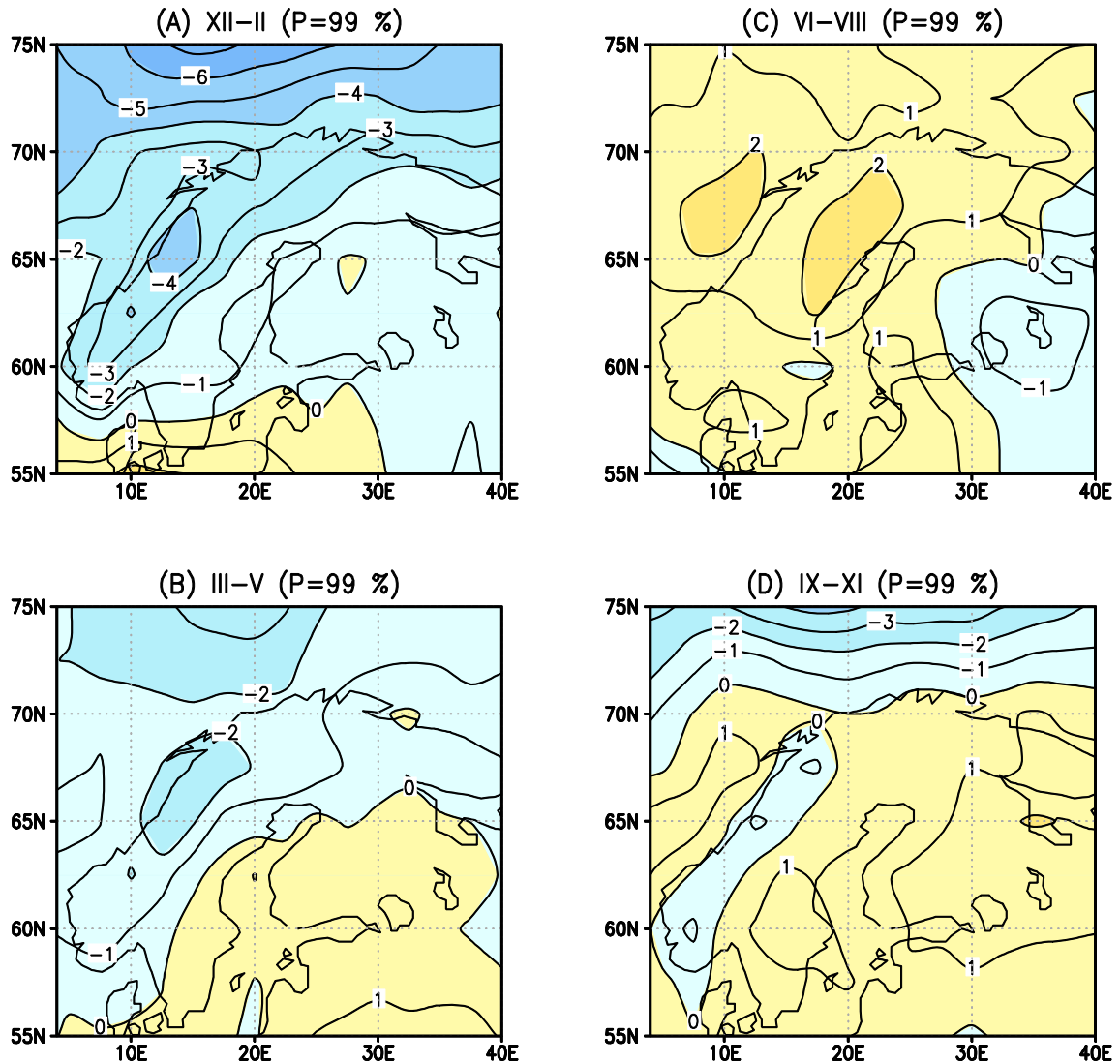
mukaan keskimääräinen roudan syvyys kyllä pienenee, mutta muutos ei vuosisadan puoliväliin mennessä olisi kivennäismailla kuin suunnilleen 10 cm:n luokkaa. Vasta vuosisadan lopulla routakerros ohenisi hieman merkittävämmiin. Kuitenkin maan keski- ja pohjoisosissa routa ulottuisi Kellomäen et al. (2010) tulosten mukaan edelleen vuosisadan lopulla helmi-maaliskuussa keskimäärin jopa metrin syvyyteen tai syvemmällekin. Etelä-Suomessakin routa ulottuisi heidän tulostensa mukaan tällöin keskimäärin syvimmillään yhä yli puolen metrin syvyyteen, mutta likimain roudattomia tilanteita voisi silti esiintyä tammi-maaliskuussa noin puolet ajasta. Kellomäki et al. (2010) käyttivät tutkimuksessaan A2-skenaariota, jossa ilmasto lämpenee jonkin verran vähemmän kuin RCP8.5-skenaariossa. Yhdenmukainen tulos kaikissa ilmastomuutoksen vaikutusta routaantumiseen käsittelevissä tutkimuksissa on se, että lämpimämmässä ilmastossa maa routaantuu syksyllä nykyistä myöhemmin ja keväällä routa sulaa nykyistä aiemmin.

Ilmastomuutoksen vaikutusta lumettoman maan routaoloihin ovat tutkineet mm. Gregow et al. (2011). Lumettomilla alueilla, kuten lumesta auratuilla metsäautoteillä, roudan paksuus on likimain verrannollinen talven aikana kertyneen pakkassumman neliöjuureen ja talvien lauhtuminen siten vähentää routaa. Talvien lauhtumisen johdosta myös talviaikaiset kelirikko-tilanteet alemmalla tieverkolla todennäköisesti yleistyvät.

3.5 Myrskyt ja tuulisuus

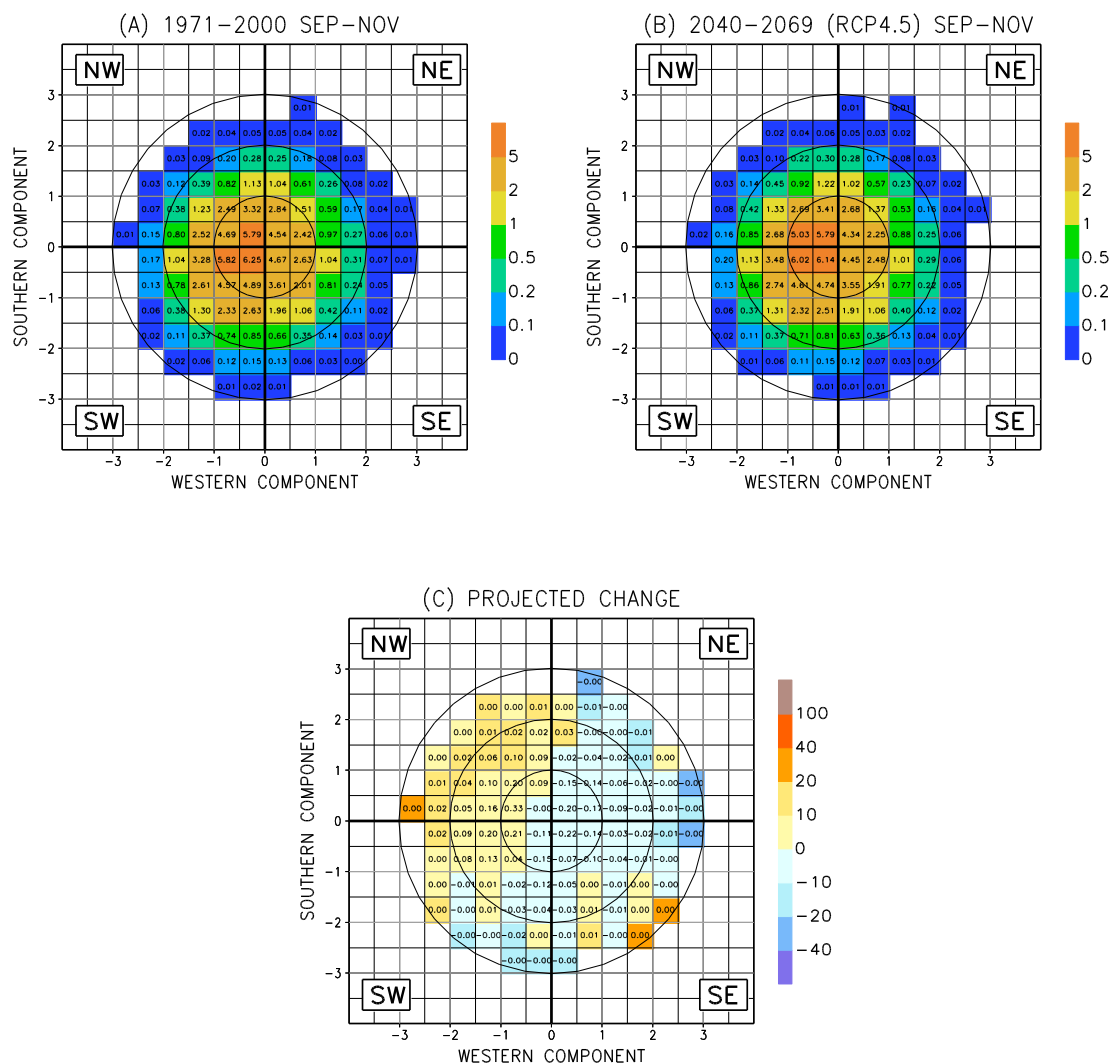
Myrskyt ovat merkittävien äkillisiä ja laaja-alaisia metsätuhoja aiheuttava sääilmiö Suomessa. Ilmassa kulkevat sähkölinjat ovat alttiita myrskytuhoille (kuva 13). Mallitulosten perusteella ilmastomuutos vaikuttaa tuulten voimakkuuksiin selvästi vähemmän kuin esimerkiksi sademääriin ja keskilämpötiloihin. Ilmatieteen laitoksella on valmistunut juuri vuoden 2019 alussa laaja tuuli-ilmaston muutoksia käsittelevä tutkimus (Ruosteenoja et al., 2019), joka perustuu 21 maailmanlaajuisen ilmastomallin tuloksiin. Tutkimuksessa keskityttiin suuren mittakaavan tuulijärjestelmiin, jotka meillä Suomessa ovat vastuussa myrskyjen aiheuttamista tuhoista muina vuodenaikoina paitsi kesällä. Kesäisiä ukkosmyräköitä käsitellään tarkemmin tämän raportin seuraavassa luvussa.

Kovien tuulten voimakkuuksien ennustettuja muutoksia Pohjois-Euroopassa eri vuodenaikoina on esitetty kuvassa 14. Arviot perustuvat ns. geostrofisen tuulen voimakkuuksiin. Geostrofinen tuuli on paine-eron aiheuttama ilmavirtaus, joka puhalttaa ilman-



Kuva 14. Kovien tuulten voimakkuuden ennustettu muutos (prosentteina) Pohjois-Euroopassa siirryttäessä jaksosta 1961–2005 jaksoon 2040–2069 RCP8.5-skenaariota mukaan: (a) talvi, (b) kevät, (c) kesä ja (d) syksy (geostrofisen tuulen voimakkuuden todennäköisyysjakautuman 99. prosenttipistearvon muutos 21 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona).

paineen samanarvonkäyrien suuntaisesti ja kuvaa keskimäärin varsin hyvin tuuliolosuhteita muutaman kilometrin korkeudella, missä maanpinnan aiheuttaman kitkan vaikutus ei tunnu. Lähellä maanpintaa tuuli kääntyy vasemmalle ja hidastuu maaston rosoisuuden aiheuttaman kitkan vaikutuksesta, mutta pinnanläheisen tuulen voimakkuus on kohtuullisen hyvin verrannollinen geostrofisen tuulen voimakkuuteen. Vaikka kuvassa 14 on tarkasteltu hyvin suurten kasvihuonekaasupäästöjen (RCP8.5-skenaario) aiheuttamaa ilmastomuutosta, ei kovien tuulten voimakkuus näytä mallitulosten keskiarvon mukaan silti muuttuvan Suomessa kuin 0–3 % verran. Talvella ja Pohjois-Suomessa myös keväällä kovat tuulet mallitulosten mukaan aavistuksenomaisesti heikkenevät. Kesällä taas matalapainemyrskyt ovat heikompia kuin muina vuodenaikoina eivätkä yleensä aiheuta laajoja tuhoja. Ainoastaan syksyllä näyttäisi olevan odotettavissa aivan vähäistä myrskyjen voimistumista, mutta tuolloinkin voimakkuuden muutos on ainoastaan yhden prosentin luokkaa.



Kuva 15. Erisuuntaisten ja -voimakkuuksisten geostrofisten tuulten esiintyminen ja yleisyyden muutos Suomessa syksyllä (syys-marraskuussa) mallitulosten perusteella. Kuva (a) esittää tuulen komponenttien perusteella muodostettua 2-ulotteista frekvenssijakaumaa (prosentteina) ajanjaksolle 1971–2000. Pienimmän ympyrän sisäpuolelle jäävät heikot tuulet, ensimmäisen ja toisen ympyrän välissä ovat kohtalaiset ja kahden ulomman ympyrän välissä kovat tuulet. Länsituulet ovat kaavion vasemmalla ja itätuulet oikealla puolella; pohjoistuulet ylhäällä ja etelätuulet alhaalla. Kuva (b) esittää vastaavaa arviota jaksolle 2040–2069 RCP4.5-skenaarion toteutuessa ja kuva (c) näiden erotusta eli ennustettua muutosta. Muutoskuvassa numerot kertovat muutoksen absoluuttisina prosenttiyksikköinä ja värit suhteellisesti prosentteina. Havainnollistava esimerkki: Hyvin heikkojen koillistuulten (ruutu välittömästi kaavion keskipisteestä oikealle ylös) osuus jaksolla 1971–2000 on 4,54 % ja jaksolla 2040–2069 4,34 %. Muutoskuvasta nähdään, että tämä vastaa 0,20 prosenttiyksikön vähennystä (numero) eli suhteellisesti ilmaisten 4,4 prosentin pudotusta (vaaleansininen väri) tällaisten tuulten esiintymisfrekvenssissä.

Todellisuudessa myrskyjen esiintyminen vaihtelee huomattavasti vuodesta toiseen vallitsevien sääolojen mukaan, ja todella voimakkaita myrskyjä sattuu vain harvoin. Viime aikojen voimakkaimmista matalapainemyrskyistä joulukuussa 2011 riehuneet Hannu- ja Tapani-myrskyt aiheuttivat Suomessa noin 3,5 miljoonaa kuutiota metsätuhoja

ja marraskuun 2001 Pyry- ja Janika-myrskyt noin 7,3 miljoonaa kuutiota. Ruotsissa tam-mikuussa 2005 raivonnut Gudrun-myrsky tuhosi metsää noin 70 miljoonaa kuutiota eli melkein yhtä paljon kuin kaikki muut myrskyt yhteensä edellisten 40 vuoden aikana (Bengtsson ja Nilsson, 2007). Tämä havainnollistaa ennen kaikkea myrskytuhojen satun-naista luonnetta; pitkän aikavälin tuhoista suuri osa aiheutuu vain muutamasta voimak-kaimmasta tai jopa yhdestä myrskystä. Toisaalta vielä voimakkaammat myrskyt kuin mitä Suomessa on viime vuosina koettu ovat myös meillä mahdollisia, eikä tällaisen myrskyn sattumisen tarvitse liittyä ilmaston muuttumiseen.

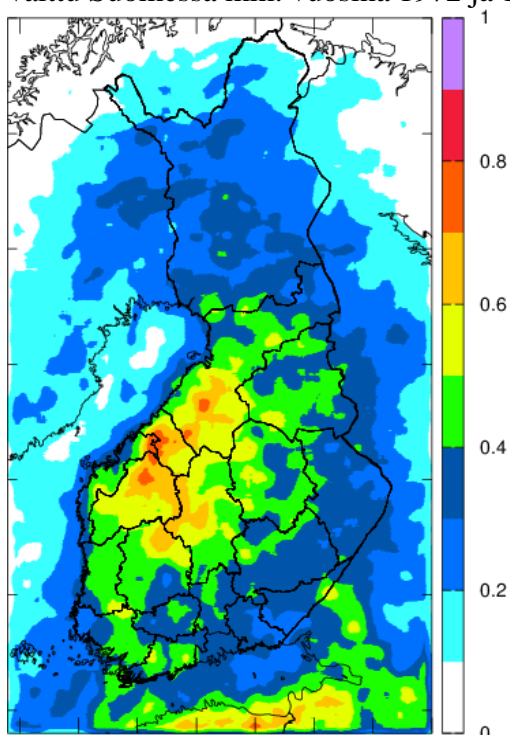
Tuulituhoja ennakoitaessa on usein oleellista tietää tuulen voimakkuuden ohella myös tuulen suunta. Kuvassa 15 on esitetty mallitulosten keskiarvona geostrofisten tuul-ten jakauma Suomen alueella jaksoilla 1971–2000 ja 2040–2069 syksyisin, jolloin kovien tuulten ennakoidaan siis hieman voimistuvan. Kuvasta nähdään, että lännen ja luoteen puoleisten kovien geostrofisten tuulten ennakoidaan jonkin verran yleistyvän, kun idän-puoleiset tuulet vastaavasti kävisivät harvinaisemmiksi. Koska pinnan lähellä todellisen tuulen suunta poikkeaa geostrofisen tuulen suunnasta maa-alueilla jopa 45°, tarkoittaa luoteenpuoleisten geostrofisten tuulten yleistyminen maanpinnan lähellä lännenpuoleis-ten tuulten yleistymistä. Tulosten mukaan kovia lännenpuoleisia tuulia esiintyisi vuosi-sadan puolivälissä siten 10–20 % enemmän kuin 1900-luvun lopulla. Jo nykyäänkin an-karimmin tuivertaa lounaasta, lännestä ja luoteesta, ja tulevaisuudessa tämä siis korostuu entisestään. Esimerkiksi sähkölinjoja suojattaessa on siten tärkeintä huolehtia linjan län-sipuolella kasvavista kaatumisvaarassa olevista puista. Toisaalta puut sopeutuvat paikal-lisiin tuuliolosuhteisiin siten, että ne ovat altteimpia harvinaisesta tuulen suunnasta pu-haltaville myrskyille.

Ruosteenojan et al. (2019) lisäksi kovien tuulten esiintymisessä ennustettuja muu-toksia Euroopan alueella ovat tutkineet mm. Groenemeijer et al. (2016). Heidän alueelli-silla ilmastomalleilla tehtyihin simulaatioihin pohjautuvan tutkimuksen tulokset olivat hyvin samansuuntaisia kuin Ruosteenojan et al. (2019) maailmanlaajuisten ilmastomal-lien simulaatioita hyödyntävän tutkimuksen tulokset. Groenemeijer et al. (2016) tutkivat nykyilmastossa kerran 50 vuodessa toistuvien tuulen nopeuksien esiintymisen odotettuja muutoksia. Suomen alueella ennustetut muutokset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Maa-alueilla kovimmat tuulet näyttäisivät Groenemeijerin et al. (2016) tulosten perus-teella yleensä ennemmin ehkä harvinaistuvan kuin yleistyvän. Merialueilla ja maan ete-läpuoliskolla myös sisämaan puolella kovat tuulet voisivat kuitenkin jonkin verran yleis-tyä vuosisadan loppupuolella RCP8.5-skenaarion toteutuessa.

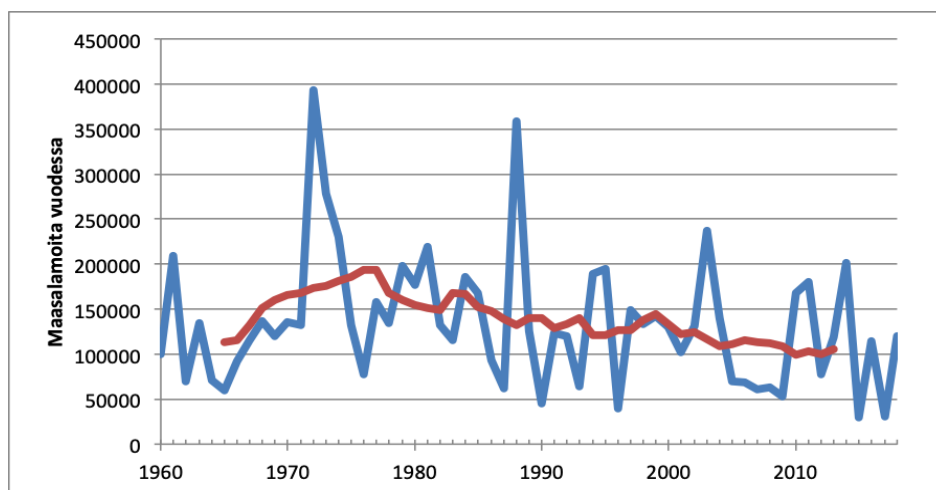
Kaiken kaikkiaan kovien tuulten esiintymisessä ennustetut muutokset ovat vähäi-siä, kun tarkastellaan laajan ilmastomallijoukon keskiarvoja. Osa yksittäisistä ilmasto-malleista ennakoit kuitenkin paljon suurempia muutoksia, mutta mallit eivät ole keske-nään yksimielisiä siitä yleistyvätkö vai harvinaistuvatko kovat tuulet. Johtuen roudan vä-henemisestä ja mahdollisesta maankosteuden lisääntymisestä myöhään syksyllä, on kui-tenkin todennäköisempää, että metsien tuulituhot jonkin verran lisääntyvät. Pidemmällä aikavälillä myös muutokset metsien puulajisuhteissa voivat vaikuttaa tuulituhojen esiin-tymiseen. Aiemman sukupolven CMIP3-mallit ennakoivat myös tuulen nopeuksien lie-västi kasvavan (Gregow et al., 2012). Toistaiseksi tuulituhojen riskissä ei ole meillä ha-vaittu merkittäviä muutoksia viimeisten vuosikymmenten aikana (Jokinen et al., 2015) ja keskimääräiset tuulen nopeudet ovat pikemminkin heikentyneet kuin voimistuneet (Laa-pas ja Venäläinen, 2017). Pidemmällä aikavälillä myrskyisyydessä on havaittu vuosikym-menten välistä vaihtelua ilman merkittävää trendiä (Bärring ja Fortuniak, 2009). Euroo-passa suuria myrskytuhoja on esiintynyt erityisesti vuoden 1990 jälkeen (Gregow et al., 2017).

3.6 Ukkonen ja salamet

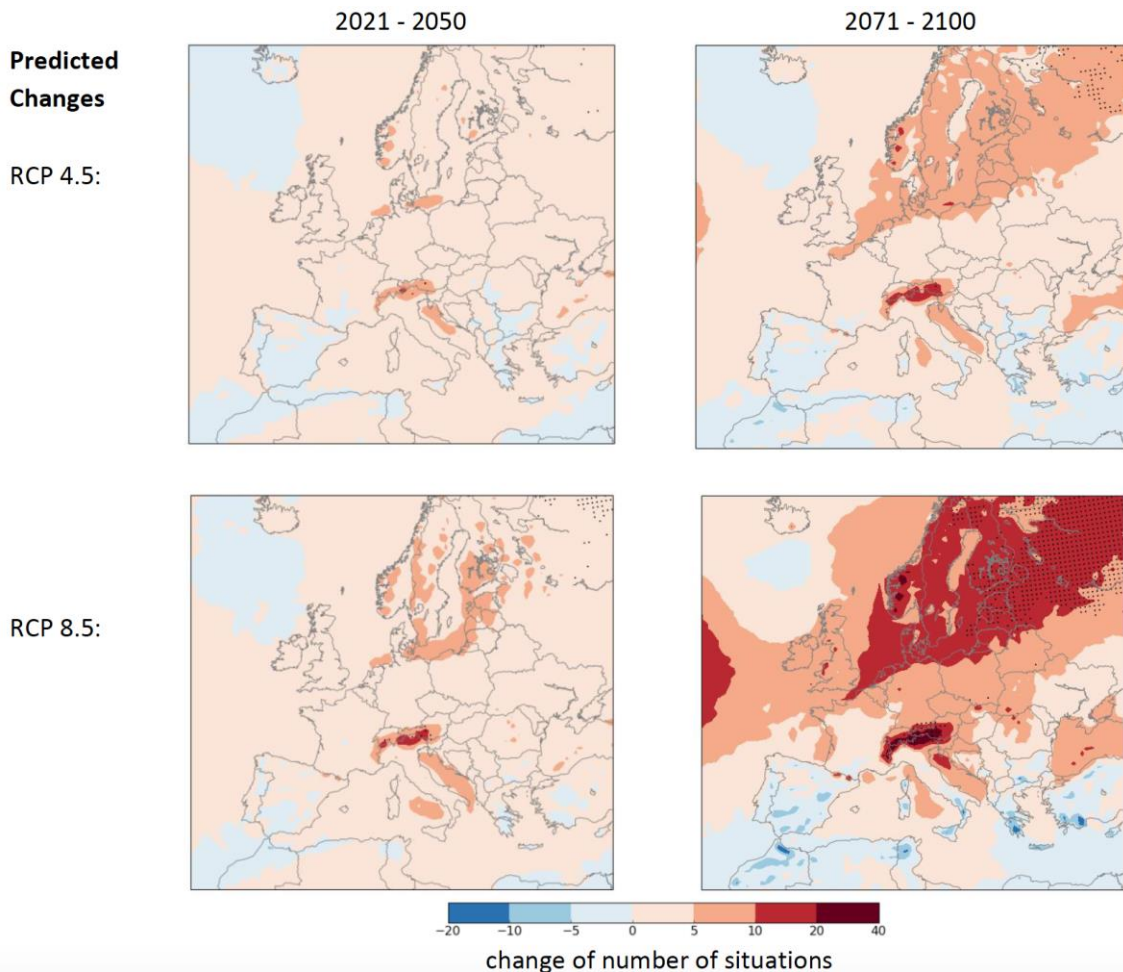
Ukkonen on yksi yleisimmistä keskeytysten aiheuttajista sähkönsiirrossa: ilmajohdot ovat otollinen kohde salamoille korkeutensa sekä hyvän sähköjohtavuutensa puolesta, ja ongelma on sama niin pien- kuin suurjänniteverkoilla. Ukkoseen liittyvät puuskatuulet voivat periaatteessa aiheuttaa täydellisen tuhon metsille ja ilmajohtosähköverkoille pienheköillä ja keskisuurilla alueilla: tästä ovat hyvin muistissa etenkin kesän 2010 rajuilmat Asta, Veera, Lahja ja Sylvi. Kesän 2010 rajuilmojen kaltaisia, suurta tuhoa laajahkoilla alueilla aiheuttaneita ukkosmyröitä on meillä sattunut tyypillisesti noin 10–15 vuoden välein. Aiemmilla vuosikymmenillä muistetaan mm. Unto-rajuilma vuodelta 2002, Sanna v. 1985, ns. Puumalan rajuilma v. 1972 ja Maire v. 1961. Vaikka etenkin mediassa kesän 2010 rajuilmoja kuvailtiin “ennennäkemättömiksi”, vielä rajumpia ukkoskausia on havaittu Suomessa mm. vuosina 1972 ja 1988.



Kuva 16. Maasalamoiden keskimääräinen vuotuinen lukumäärä neliökilometriä kohti jaksolla 2002–2018.



Kuva 17. Maasalamoiden vuosittainen lukumäärä Suomessa jaksolla 1960–2018 (sininen käyrä) ja salamoinnin määrän kymmenen vuoden liukuva keskiarvo (punainen käyrä).



Kuva 18. Rajuilmolle suotuisten olosuhteiden muutokset Euroopassa RCP4.5- (ylärivi) ja RCP8.5-skenaarioiden (alarivi) mukaisesti siirryttäessä jaksolta 1971–2000 jaksolle 2021–2050 (vasemmanpuoleiset kuvat) ja jaksolle 2071–2100 (oikeanpuoleiset kuvat). Tilastollisesti merkitsevän muutoksen alueet on osoitettu mustalla pisteytyksellä. Kuva on peräisin Groenemeijerin et al. (2016) raportista.

Suomen ukkosilmastolle on tyypillistä suuri ajallinen ja paikallinen vaihtelu: salamamäärät ja voimakkaimpien ukkosten esiintymisalueet vaihtelevat vuodesta toiseen. Ilmatieteen laitoksen salamanpaikantimen havaintojen mukaan keskimäärin eniten salamoita maan länsi- ja keskiosissa ja vähiten Lapissa (kuva 16). Yksittäinen ukkonen voi kuitenkin olla yhtä raju missä päin tahansa Suomea pohjoisinta Lappia myöten.

Vuodesta 1960 lähtien Suomen maasalalamäärissä on havaittavissa heikko laskeva trendi (kuva 17). Koska Ilmatieteen laitoksen tilastot rajoittuvat Suomeen, on hyvin todennäköistä, että joinain vähäsalamaisina kesinä voimakkaita ukkosia on kuitenkin esiintynyt nipin napin Suomen rajojen ulkopuolella. Koska ukkoset ja salamat eivät tunnista maiden rajoja, mielekkäintä olisi laskea salamatilastoja ilmastollisesti yhtenäisiltä alueilta yksittäisen maan sijaan; valitettavasti tähän ei toistaiseksi ole olemassa riittävän yhtenäistä havaintoaineistoa eri maista.

Ukkosten esiintymisen ja voimakkuuden kannalta keskeisiä tekijöitä ovat ilmakehän kosteus ja epävakaisuus: mitä enemmän kosteutta ilmassa on, ja mitä suurempi on lämpötilaero troposfäärin ala- ja yläosien välillä, sitä paremmat edellytykset on olemassa etenkin voimakkaille ukkosille. Koska lämpimämpi ilma voi pitää sisällään enemmän

kosteutta, lämmennyt ilmasto sinänsä suosii ukkosten esiintymistä tulevaisuudessa. Yhtälö ei käytännössä ole aivan näin suoraviivainen, koska ukkosten syntyyn liittyy muitakin tekijöitä kuin vain lämpö ja kosteus.

Ilmastonmuutoksen vaikutusta ukkosille suotuisten olosuhteiden esiintymiseen on tutkittu osana RAIN-hanketta (Groenemeijer et al., 2016). Kuvan 18 mukaan sekä RCP4.5- että RCP8.5-skenaarioiden toteutuessa ukkosille suotuisten olosuhteiden määrä todennäköisesti kasvaa suurimmassa osassa Eurooppaa. Vielä vuosisadan puoliväliin mennessä muutos on kuitenkin pieni. Vuosisadan lopulle tultaessa Pohjois-Eurooppa on muutoksen merkittävimpiä alueita. Suomen alueella tilastollisesti merkitsevä muutos havaitaan vain suurten päästöjen RCP8.5-skenaariossa vuosisadan lopun tilannetta tarkasteltaessa; tällöin ukkosille suotuisia olosuhteita esiintyisi tulosten mukaan meillä reilut 10 % useammin kuin 1900-luvun lopulla.

Tällä hetkellä ei ole varmaa tietoa siitä, ilmeneekö ukkosille suotuisten olosuhteiden lisääntyminen suurempana rajuilmojen määränä vai voimakkaimpien ukkostilanteiden runsastumisena tai mahdollisesti molempina. Todennäköisimmältä kuitenkin näyttäisi, että tulevaisuudessa ukkoset voisivat olla entistä rajumpia.

3.7 Merenpinnan korkeus

Pitkällä aikavälillä tarkasteltuna meriveden pinnan korkeuteen Suomen rannikolla vaikuttaa keskeisesti kolme tekijää:

1. Ilmaston lämpeneminen, joka nostaa merenpintaa veden lämpölaajenemisen sekä mannerjäätiköiden (Grönlanti, Antarktis) sulamisen vaikutuksesta;
2. maan kohoaminen jääkauden jäljiltä;
3. tuuliolosuhteiden mahdolliset muutokset.

Maan kohoaminen on voimakkainta Pohjanlahden rannikolla, esimerkiksi Vaasassa 9,85 mm/vuosi, ja pienintä Suomenlahden itäosissa, esimerkiksi Haminassa vain 4,05 mm/vuosi. Pitkälti tästä johtuen muutokset meriveden pinnan korkeudessa tämän vuosisadan aikana ovat erilaisia eri puolilla Suomen rannikkoa.

Arviot merenpinnan noususta on päivitetty tuoreessa tutkimuksessa (Pellikka et al., 2018). Ennusteet merenpinnan noususta pitkällä aikavälillä yhdistettiin havaintoihin perustuviin arvioihin lyhytaikaisista vedenkorkeuden vaihteluista, jotta voitiin arvioida rannikkotulvien todennäköisyyksiä tulevaisuudessa. Tulvariski kasvaa selvästi eniten Suomenlahden rannikolla, missä maankohoaminen on hitaampaa kuin Pohjanlahden rannikolla. Suomenlahdella merenpinta voi nousta jopa 80–90 cm tämän vuosisadan aikana, mutta maankohoaminen huomioiden keskimääräinen arvio merenpinnan nousulle on vain noin 30 cm. Suuri epävarmuus johtuu ennen kaikkea siitä, ettei mannerjäätiköiden käyttäytymistä lämpenevässä ilmastossa osata ennustaa vielä kovin hyvin. Arviot kerran 20, kerran 50 ja kerran 100 vuodessa saavutettaville meriveden korkeuksille vuosien 2010, 2050 ja 2100 olosuhteissa on esitetty taulukossa 1. Perämeren rannikolla maankohoaminen on aluksi nopeampaa kuin meriveden pinnan nousu, mutta vuosisadan lopulla tilanne kääntyy nykyisten arvioiden mukaan päinvastaiseksi. Tulvariskit olisivat siellä siten vajaan sadan vuoden kuluttua suunnilleen nykyisellä tasolla. Selkämeren ja Suomenlahden rannikoilla tulvariskit muuttuvat vuosisadan puoliväliin mennessä vain vähän, mutta vuosisadan loppua kohden tulvariski kasvaa etenkin Suomenlahden rannikolla. Esimerkiksi tammikuussa 2005 Suomenlahden rannikolla koettu ennätystulva voisi vuosisadan lopulla toistua jopa toinen vuosi.

Taulukko 1. N2000-korkeusjärjestelmän mukaiset meriveden korkeudet, jotka saavutetaan arviolta kerran 20 vuodessa, kerran 50 vuodessa ja kerran 100 vuodessa vuosien 2010, 2050 ja 2100 ilmasto-olosuhteissa (Pellikka et al., 2018). Korkeusjärjestelmä N2000 perustuu Suomen kolmanteen tarkkavaaitukseen (1978–2006) ja sen mukaiset vedenkorkeudet on laskettu vuoden 2000 maannousun mukaisina.

Toistuvuus aika (tapauksia/vuosi)	Meriveden korkeus (cm, N2000-korkeusjärjestelmä)								
	1/20			1/50			1/100		
	2010	2050	2100	2010	2050	2100	2010	2050	2100
Year									
Kemi	194	179	196	214	199	217	229	214	233
Oulu	192	179	198	211	198	218	226	213	233
Raahe	162	149	172	176	163	189	186	173	201
Pietarsaari	147	133	157	159	146	174	168	155	186
Vaasa	143	128	149	158	143	167	169	155	180
Kaskinen	140	129	160	154	143	177	164	154	190
Mäntyluoto	134	127	163	147	140	179	157	150	192
Rauma	134	130	171	146	142	188	155	152	200
Turku	137	139	187	149	151	204	157	160	216
Degerby (Föglö)	117	118	166	129	130	183	138	139	195
Hanko	134	142	200	146	154	217	155	163	229
Helsinki	159	168	225	174	183	243	185	194	256
Hamina	194	204	258	212	222	278	225	236	293

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Suomen ilmasto lämpenee tällä hetkellä noin 0,3–0,4 °C vuosikymmenessä. Tämä tarkoittaa vuodenaikojen siirtymistä karkeasti noin viikolla 30 vuodessa; kevään ja kesän tulo aikaistuvat, kun taas syksyn ja talven alut siirtyvät myöhäisemmiksi. Seuraavien noin 20–30 vuoden ajan lämpenemisen odotetaan jatkuvan suunnilleen nykyisenkaltaisella vauhdilla. Tämän jälkeen lämpenemisen voimakkuus riippuu suuresti siitä, miten kasvihuonekaasujen päästöt kehittyvät, mutta epävarmuutta liittyy myös siihen, miten voimakkaasti maapallon ilmastojärjestelmä reagoi ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien muutoksiin.

Verrattaessa tässä raportissa esitettyjä tuloksia VTT:n vuoden 2006 raportin tuloksiin huomataan, että pääpiirteiltään tulokset ovat hyvinkin samankaltaisia. Lämpötilan ennustetaan kohoavan ja sademäärän lisääntyvän etenkin talvella. Rankkasateet voimistuvat kaikkina vuodenaikoina. Talvella lauhtuvat eniten kylmät ääriämpötilat. Lumi-kuormiin ja huurteen kertymiseen liittyvät viat voivat lisääntyä Itä- ja Pohjois-Suomessa. Myrskyisyydessä ei todennäköisesti tapahdu suuria muutoksia, mutta roudan väheneminen voi jossain määrin lisätä myrskytuhoja ja ennen kaikkea vaikeuttaa sähköverkon kunnossapito- ja rakennustöitä sellaisilla alueilla, joilla sula maa ei yleensä kannata raskaita työkoneita. Ilmastomuutoksen vaikutusta ukkosten ja kesäisten rajuilmojen esiintymiseen on vaikea arvioida, mutta ilmaston lämpeneminen voi jonkin verran lisätä ukkosille suotuisia olosuhteita.

Kiitokset

Kiitämme Caruna Networks Oy:n edustajia tämän raportin sisältöä koskevasta rakentavasta palautteesta. Lisäksi kiitämme Ilona Lángia raportin sisällön kommentoimisesta. Ruotsinkielisen tiivistelmän kääntämisessä ovat avustaneet Anne Borgström, Natalia Korhonen ja Cecilia Karlsson.

Kirjallisuusviitteet

Asikainen, A., H. Viiri, S. Neuvonen, S. Nevalainen, J. Lintunen, J. Laturi, J. Uusivuori, A. Venäläinen, I. Lehtonen ja K. Ruosteenoja, 2019: Ilmastomuutos ja metsätuhot – analyysi ilmaston lämpenemisen seurauksista Suomen osalta. Suomen ilmastopaneeli, 76 s.

Bengtsson, A. ja C. Nilsson, 2007: Extreme value modelling of storm damage in Swedish forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 515–521.

Brown, R. D. ja P. W. Mote, 2009: The response of northern hemisphere snow cover to a changing climate. *Journal of Climate* 22: 2124–2145.

Bärring, L. ja K. Fortuniak, 2009: Multi-indices analysis of southern Scandinavian storminess 1780–2005 and links to interdecadal variations in the NW Europe–North Sea region. *International Journal of Climatology* 29: 373–384.

Döscher, R., U. Willén, C. Jones, A. Rutgersson, H. E. Markus Meier, U. Hansson ja L. Phil Graham, 2002: The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. *Boreal Environment Research*, 7: 183–192.

Gregow, H., A. Laaksonen ja M. E. Alper, 2017: Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010, *Scientific Reports*, 7, 46397, doi:10.1038/srep46397.

Gregow, H., K. Ruosteenoja, N. Pimenoff ja K. Jylhä, 2012: Changes in the mean and extreme geostrophic wind speeds in Northern Europe until 2100 based on nine global climate models. *International Journal of Climatology*, 32: 1834–1846.

Gregow, H., K. Ruosteenoja, I. Juga, S. Näsman, M. Mäkelä, M. Laapas ja K. Jylhä, 2011: Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa. *Ilmatieteen laitos Raportteja* 2011:5, 45 s.

Groenemeijer, P., N. Becker, M. Djidara, K. Gavin, T. Hellenberg, A. M. Holzer, I. Juga, P. Jokinen, K. Jylhä, I. Lehtonen, H. Mäkelä, O. Morales Napoles, K. Nissen, D. Paprotny, P. Prak, T. Púčik, L. Tjssen ja A. Vajda, 2015: Past cases of extreme weather impact on critical infrastructure in Europe. *European Severe Storms Laboratory*, 129 s.

Groenemeijer, P., A. Vajda, I. Lehtonen, M. Kämäräinen, A. Venäläinen, H. Gregow, N. Becker, K. Nissen, U. Ulbrich, O. Morales Nápoles, D. Paprotny ja T. Púčik, 2016: Present and future probability of meteorological and hydrological hazards in Europe. *European Severe Storms Laboratory*, 165 s.

Horelli, I., 2012: Tapaninpäivän 26.12.2011 myrskytuhot Lounais-Suomessa. *Lounais-Suomen aluehallintovirasto*, 25 s.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 881 s.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 s.

IPCC, 2018: Summary for policymakers. In: *Global warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC, 32 s.

Jokinen, P., A. Vajda ja H. Gregow, 2012: The benefits of emergency rescue and reanalysis data in decadal storm damage assessment studies. *Advances in Science & Research* 12: 97–101.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J. ja Fronzek, S.: 2012. *Ilmasto. Julkaisussa: Ruuhela, R. (toim.) 2012. Miten väistämättömään ilmastonmuutokseen voidaan varautua?* –

yhteenvedo suomalaisesta sopeutumistutkimuksesta eri toimialoilla. Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki. MMM:n julkaisuja 6/2011: 16–23.

Katajisto, R., 1969: Rankkasateiden voimakkuus ja toistumistiheys Suomessa. Helsinki: Rakennushallitus. Rakennushallituksen tiedotuksia.

Kellomäki, S., M. Maajärvi, H. Strandman, A. Kilpeläinen ja H. Peltola, 2010: Model computations on the climate change effects on snow cover, soil moisture and soil frost in the boreal conditions over Finland. *Silva Fennica* 44: 213–233.

Kim, S., V. A. Sinclair, J. Räisänen ja R. Ruuhela, 2018: Heat waves in Finland: present and projected summertime extreme temperatures and their associated circulation patterns. *International Journal of Climatology* 38: 1393–1408.

Knight, J. R., C. K. Folland ja A. A. Scaife, 2006: Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters* 33: L17706.

Laapas, M. ja A. Venäläinen, 2017: Homogenization and trend analysis of monthly mean and maximum wind speed time series in Finland, 1959–2015. *International Journal of Climatology* 37: 4803–4813.

Lahti, K., M. Lahtinen ja K. Nousiainen, 1997: Transmission line corona losses under hoar frost conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery* 12: 928–933.

Láng, I., 2017: Myrskyjen luokittelua ja vaikutuksia sähköverkkoihin Suomessa. Pro Gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, 46 s.

Lehtonen, I., K. Ruosteenoja ja K. Jylhä, 2014: Projected changes in European extreme precipitation indices on the basis of global and regional climate model ensembles. *International Journal of Climatology* 34: 1208–1222.

Lehtonen, I., M. Kämäräinen, H. Gregow, A. Venäläinen ja H. Peltola, 2016: Heavy snow loads in Finnish forests respond regionally asymmetrically to projected climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16: 2259–2271.

Lehtonen, I., A. Venäläinen, M. Kämäräinen, A. Asikainen, J. Laitila, P. Anttila ja H. Peltola, 2019: Projected decrease in wintertime bearing capacity on different forest and soil types in Finland under a warming climate. *Hydrology and Earth System Sciences* 23: 1611–1631.

Luomaranta, A., J. Aalto ja K. Jylhä, 2019: Snow cover trends in Finland over 1961–2014 based on gridded snow depth observations. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.6007.

Martikainen, A., 2006: Ilmastomuutoksen vaikutus sähköverkkoliiketoimintaan. Valtion Taloudellinen Tutkimuskeskus, 74 s.

Mikkonen, S., M. Laine, H. M. Mäkelä, H. Gregow, H. Tuomenvirta, M. Lahtinen ja A. Laaksonen, 2015: Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29: 1521–1529.

Mäkelä, A., I. Lehtonen, K. Ruosteenoja, K. Jylhä, H. Tuomenvirta ja A. Drebs, 2016: Ilmastomuutos pääkaupunkiseudulla. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2016:8, 28 s.

Nakičenič, N., A. Joseph, D. Gerald, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T. J. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. M. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. J. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor ja Z. Dadi, 2000: Special Report on Emission Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 599 s.

Partanen, J., J. Lassila, T. Kaipia ja J. Haakana, 2012: Sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantamiseen sekä sähkökatkojen vaikutusten lieventämiseen tähtävien toimenpiteiden arviointi. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, 61 s.

Pellikka, H., U. Leijala, M. Johansson, K. Leinonen, K. K. Kahma, 2018: Future probabilities of coastal floods in Finland. *Continental Shelf Research*, 157, 32–42.

Ruosteenoja, K., 2013: Ilmastomuutos pääkaupunkiseudulla – vuoden 2013 loppuun mennessä tehtyihin laskelmiin perustuvia arvioita. Ilmatieteen laitos, 11 s.

Ruosteenoja, K., K. Jylhä ja M. Kämäräinen, 2016: Climate projections for Finland under the RCP forcing scenarios. *Geophysica* 51: 17–50.

Ruosteenoja, K., T. Vihma ja A. Venäläinen, 2019: Projected changes in European and North Atlantic seasonal wind climate derived from CMIP5 simulations. Käsikirjoitus on lähetetty arvioitavaksi lehteen *Journal of Climate*.

Räisänen, J., 2016: Twenty-first century changes in snowfall climate in Northern Europe in ENSEMBLES regional climate models. *Climate Dynamics* 46: 339–353.

Räisänen, J. ja J. Eklund, 2012: 21st century changes in snow climate in Northern Europe: a high-resolution view from ENSEMBLES regional climate models. *Climate Dynamics* 38: 2575–2591.

Saku, S., A. Mäkelä A., K. Jylhä ja N. Niinimäki, 2016: Lyhytkestoisten sateiden rankkuus ja toistuvuus aika Suomessa. Ilmatieteen laitos, 15 s.

Serreze, M. C. ja R. G. Barry, 2011: Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change* 77: 85–96.

Sutton, R. T. ja D. L. R. Hodson, 2005: Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science* 309: 115–118.

van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.

J. Smith ja S. K. Rose, 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109: 5–31.

Veijalainen, N., K. Ruosteenoja, J. Uusikivi, A. Mäkelä ja B. Vehviläinen, 2018: Ilmastonmuutos ja virtaamien muuttuminen Kemi-, Kymi- ja Lieksanjoen alueilla. Suomen Ympäristökeskuksen Raportteja 27/2018, 44 s.

Venäläinen, A., H. Tuomenvirta, M. Heikinheimo, S. Kellomäki, H. Peltola, H. Strandman ja H. Väisänen, 2001: Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research* 17: 63–72.

Westra, S., H. J. Fowler, J. P. Evans, L. V. Alexander, P. Berg, F. Johnson, E. J. Kendon, G. Lenderink ja N. M. Roberts, 2014: Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics* 52: 522–555.



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

ILMATIETEEN LAITOS

Erik Palménin aukio 1

00560 HELSINKI

puh. 029 539 1000

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI

ILMATIETEEN LAITOS

RAPORTTEJA 2019:2

ISBN 978-952-336-071-6

ISBN 978-952-336-077-8 (pdf)

ISSN 0782-6079

Erweko

Helsinki 2019

